

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Řešení zakončení optických vláken pro VLC aplikace
Solution of Optical Fiber Ends for VLC Applications

2019

Bc. Martin Hrobárik

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Hrobárik**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Řešení zakončení optických vláken pro VLC aplikace**
Solution of Optical Fiber Ends for VLC Applications

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Během řešení předkládané práce se předpokládá, že student bude schopen simulovat v softwarové aplikaci LightTools optická vlákna s ohledem na zakončení. Budou testována různá optická vlákna, jejich zapojení, rozvrhnutí, počet a především zakončení na rovnoměrnou distribuci optické intenzity na definované ploše. Simulace se poté budou porovnávat s reálnými měřeními zhotovenými v laboratořích.

Při řešení postupujte podle následujících bodů:

1. Studium vnitřních bezvláknových optických sítí využívajících konvenčních optických vláknech.
2. Analýza a simulace vhodných geometrických zakončení optických vláken pro vytvoření optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě v softwarové aplikaci LightTools.
3. Experimentální měření rovnoměrného rozložení optické intenzity v temné místnosti.
4. Zhodnocení naměřených a simulovaných dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1]ZBOŘIL, Ondřej. Kónická zakončení optických vláken pro senzorové aplikace. Ostrava, 2013, Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.

[2]KORČEK, Tomáš. Vytvoření simulace optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech. Ostrava, 2014, Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.

[3]CHAVÍK, Jan. Měření optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech. Ostrava, 2016, Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.

[4]HROMULÁK, Daniel. Model optického vysílače založený na optických vláknech pro vnitřní bezvláknové sítě. Ostrava, 2016, Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.

[5]IEEE 802.15.7. Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011.

[6]WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. High-speed

duplex optical wireless communication system for indoor personal area networks. Optics Express. 2010, roč. 18, č. 24, s. 25199-25216. ISSN 1094-4087.

[7]WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. Gigabit optical wireless communication system for indoor applications. In: Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia. Shanghai: IEEE, 2010, 453 - 454. ISBN 978-1-4244-7111-9.

[8]WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. High-Speed Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. IEEE Photonics Technology Letters. 2011, roč. 23, č. 8, s. 519-521. ISSN 1041-1135.

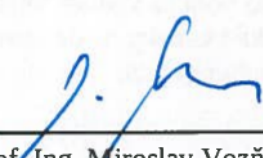
[9]WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. 4x12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. Journal of Lightwave Technology. 2011, roč. 29, č. 13, s. 1988-1996. ISSN 0733-8724.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**


Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry






prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 30. apríla 2019


.....
podpis študenta

Diplomová práca bola vypracovaná v rámci projektu: „BroadbandLIGHT – ověřování možností využití technologií instalovaných na SMART polygonu veřejného osvětlení & Nové vláknově optické technologie pro komunikace a senzory“, reg. č.: SP2019/143 a SP2019/80 Špecifického výskumu financovaného Ministerstvom školstva, mládeže a telovýchovy Českej republiky.

Pod'akovanie

Rád by som sa poďakoval vedúcemu tejto diplomovej práce Ing. Janovi Látalovi, Ph.D. za pomoc pri jej vytváraní. Ing. Janovi Vitáskovi, Ph.D. za rady a konzultácie týkajúce sa simulácií v softvéri LightTools a Ing. Alešovi Vanderkovi za pomoc pri konštrukcii optického vláknového vysielača.

Abstrakt

Cieľom tejto práce je vytvoriť optický vláknový vysielateľ v softvérovej aplikácii LightTools a nájsť najvhodnejšie pozície a zakončenia vlákien v počte 7 a 19 s ohľadom na rozloženie optickej intenzity na 1/8 gule s 3 dB kolísaním optického výkonu. Následný cieľ po simuláciách v danom softvéri je vytvoriť skutočný vláknový vysielateľ s konfiguráciou zhodnou s najlepšimi výsledkami dosiahnutými pri simulácii. Po skonštruovaní a nameraní výsledkov vláknového vysielateľa sa porovnajú simulované a reálne namerané výsledky. V úvode práce je vysvetlená problematika optických sietí. Ide o zhrnutie histórie štúdie svetla, optických veličín, optických vláknových a bezvláknových sietí a komponentov, ktoré sú v nich používané a tiež bezpečnosť optického žiarenia. Nasleduje postup simulácie a merania.

Kľúčové slová

optické vlákno; LED; bezpečnosť žiarenia; LightTools; optický vláknový vysielateľ; rozloženie výkonu

Abstract

The objective of this diploma thesis is to create an optical fiber transmitter in the software application LightTools and to find the most suitable mesh positions and terminations in numbers 7 and 19 considering the distribution of optical intensity on 1/8 of the sphere with 3 dB fluctuation of optical power. The following goal after the simulation in this software is to create a real fiber transmitter with a configuration that matches the most efficient achieved results in the simulation. After constructing and measuring the fiber transmitter results, the simulated and real measured results are compared. At the beginning of the work the relations of optical networks are explained. It is a summary of the study of light, optical quantities, optical fiber and fiber-free networks and components used in them and also optical radiation safety. Following is the simulation and measurement procedure.

Key words

optical fiber; LED; radiation safety; LightTools; optical fiber transmitter; power distribution

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
c	$m \cdot s^{-1}$	rýchlosť svetla
n	-	index lomu
Φ_e	W; J	žiarivý tok
I_e	$W \cdot sr^{-1}$	žiarivosť
L_e	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	žiar, plošná žiarivosť (jas)
M_e	$W \cdot m^{-2}$	intenzita vyžarovania
E_e	$W \cdot m^{-2}$	intenzita ožiarenia
H_e	$W \cdot s \cdot m^{-2}$	expozícia
Q_e (E)	J	žiarivá energia
φ_e	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	plošná hustota
Q	$lm \cdot s$	svetelné množstvo
Φ	<i>lumen [lm]</i>	svetelný tok
I	<i>kandela [cd]</i>	svietivosť
L	$cd \cdot m^{-2}$	jas
M	$lm \cdot m^{-2}$	svetlenie (intenzita svetlenia)
E	<i>lux; lx</i>	osvetlenie (intenzita osvetlenia)
H	$lx \cdot s$	expozícia (osvit)
A	<i>dB</i>	útlm

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
GSM	Time Division Multiplexing
UMTS	Voice over Internet Protocol
LTE	Long-Term Evolution
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
HAP	High Altitude Platform
LED	light-emitting diode
FSO	Free Space Optic
OW	Optical Wireless
VLC	Visible Light Communication
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LD	Laser Diode
PHY	Physical Layer
MAC	Medium Access Control
VPAN	Visible Personal Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
OOK	On-Off Keying
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
CSK	Color Shift Keying
DTIRC	Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrators
CDS	Conventional-Diffuse-System
LSMS	Line-Strip-Multibeam-Transmitter
RFR	Radio-Frequency Radiation
ICNIRP	International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection
DNA	Deoxyribonucleic Acid
CD	Compact Disc
DVD	Digital Optical Disc
NA	Numeric Aperture

PDMS

Polydimethylsiloxan

Zoznam obrázkov

<i>Obrázok 1.1: Spektrum elektromagnetického žiarenia</i>	- 20 -
<i>Obrázok 3.1: Časti optického vlákna[6]</i>	- 25 -
<i>Obrázok 3.2: Medzný uhol, odraz svetla[1]</i>	- 26 -
<i>Obrázok 3.3: Útlmová charakteristika kremenného vlákna</i>	- 28 -
<i>Obrázok 3.4: Spektrum elektromagnetického žiarenia[16]</i>	- 29 -
<i>Obrázok 3.5: Ohyb vlákna [3]</i>	- 30 -
<i>Obrázok 3.6: Chromatická disperzia [12]</i>	- 31 -
<i>Obrázok 4.1: Model horizontálneho optického spoja[16]</i>	- 32 -
<i>Obrázok 4.2: Model vertikálneho optického spoja[16]</i>	- 33 -
<i>Obrázok 4.3: Koncepty OW komunikácií[16]</i>	- 35 -
<i>Obrázok 4.4: LED s luminoforom[22]</i>	- 34 -
<i>Obrázok 4.5: Zložená LED[22]</i>	- 36 -
<i>Obrázok 4.6: Topológie používané vo VPAN [23]</i>	- 38 -
<i>Obrázok 5.2: Spojky[26]</i>	- 40 -
<i>Obrázok 5.2: Rozptylky[26]</i>	- 40 -
<i>Obrázok 5.3: 1- Fresnelova šošovka 2 - bežná šošovka [26]</i>	- 41 -
<i>Obrázok 5.4: Hemisférický koncentrátor [16]</i>	- 42 -
<i>Obrázok 5.5: Parabolický koncentrátor [16]</i>	- 43 -
<i>Obrázok 5.6: DTIRC koncentrátor [16]</i>	- 43 -
<i>Obrázok 6.1: Konvenčný difúzny systém[4]</i>	- 44 -
<i>Obrázok 6.2: Jednopásmový viacvážkový vysielateľ[4]</i>	- 45 -
<i>Obrázok 6.3: Viacpásmový viacvážkový vysielateľ[4]</i>	- 45 -
<i>Obrázok 6.4: Diamantový viacvážkový vysielateľ[4]</i>	- 46 -
<i>Obrázok 6.5: Umiestnenie vysieláčov na strope[27]</i>	- 46 -
<i>Obrázok 6.6: Vyviazanie svetla z vlákna s D-profilom[29]</i>	- 47 -
<i>Obrázok 6.7: Zúžený koniec vlákna[22]</i>	- 48 -
<i>Obrázok 6.8: Rozšírený koniec vlákna[22]</i>	- 48 -
<i>Obrázok 6.9: Guľa na konci vlákna[22]</i>	- 48 -
<i>Obrázok 6.10: Inverzný kužeľ na konci vlákna[30]</i>	- 49 -
<i>Obrázok 6.11: Optický vysielateľ Wangovho tímu[32]</i>	- 49 -
<i>Obrázok 6.12: Zobrazenie usporiadania vlákien- vľavo 7, vpravo 19[4]</i>	- 50 -
<i>Obrázok 7.1: Smernica ICNIRP[35]</i>	- 52 -
<i>Obrázok 7.2: Ľudské oko</i>	- 53 -
<i>Obrázok 8.1: LightTools rozhranie</i>	- 59 -
<i>Obrázok 8.3: Nastavenie rozmerov jadra vlákna</i>	- 59 -
<i>Obrázok 8.4: Nastavenie materiálu jadra vlákna</i>	- 60 -
<i>Obrázok 8.5: Nastavenie indexu lomu pre vlastný materiál</i>	- 60 -
<i>Obrázok 8.6: Nastavenie súradníc</i>	- 61 -
<i>Obrázok 8.7: Zobrazenie objektu</i>	- 62 -

<i>Obrázok 8.8: Pridanie detektoru.....</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Obrázok 8.10: Tienidlo a prijímač.....</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Obrázok 8.11: Filter svetla LED.....</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Obrázok 8.12: Zoskupenie objektov.....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Obrázok 8.13: Zakončenie vlákna.....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Obrázok 8.14: Usporiadanie vlákien: vľavo 7, vpravo 19.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Obrázok 8.15: Výsledok optimalizácie LightTools.....</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Obrázok 8.16: Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Obrázok 8.17: Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Obrázok 8.18: Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Obrázok 8.19: Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Obrázok 8.20: Simulácie vysielacza z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Obrázok 8.21: Simulácie vysielacza z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Obrázok 8.22: Simulácie vysielacza z 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Obrázok 8.23: Simulácie vysielacza z 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1</i>	<i>- 75 -</i>
<i>Obrázok 9.1: Schéma pracoviska.....</i>	<i>- 76 -</i>
<i>Obrázok 9.2: Schéma plošného spoja</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Obrázok 9.3: 3D vykreslenie plošného spoja Obrázok 9.4: Osvecovaný návrh plošného spoja</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Obrázok 9.5: Brúsenie a leštenie vlákna.....</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Obrázok 9.6: Nanášanie PDMS.....</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Obrázok 9.7: Uchytenie 7 vlákien</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Obrázok 9.8: Prijímacia plocha.....</i>	<i>- 80 -</i>
<i>Obrázok 9.9: Osi detekčnej plochy</i>	<i>- 80 -</i>
<i>Obrázok 9.10: Porovnanie výsledkov pre 7 vlákien s náklonom 2 stupne</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Obrázok 9.11: Porovnanie výsledkov pre 19 vlákien s náklonom 2 stupne</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Obrázok 9.12: Porovnanie výsledkov pre 19 vlákien s náklonom 4 stupne</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Obrázok 9.13: Porovnanie výsledkov pre 7 vlákien s náklonom 2 stupne, zakončením polguľou.....</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Obrázok 9.14: Porovnanie výsledkov pre 19 vlákien s náklonom 2 stupne, zakončením polguľou.</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Obrázok 9.15: Porovnanie výsledkov pre 19 vlákien s náklonom 4 stupne, zakončením polguľou.</i>	<i>- 83 -</i>

<i>Obrázok 9.16: Graf rezu intenzity 7 vláken s náklonom 2 stupne.....</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Obrázok 9.17: Graf rezu intenzity 19 vláken s náklonom 2 stupne.....</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Obrázok 9.18: Graf rezu intenzity 19 vláken s náklonom 4 stupne.....</i>	<i>- 85 -</i>

Zoznam tabuliek

<i>Tabuľka 2.1: Príbuznosť rádiometrických a fotometrických veličín[5]</i>	- 22 -
<i>Tabuľka 2.2: Rádiometrické veličiny a jednotky[5]</i>	- 23 -
<i>Tabuľka 2.3: Fotometrické veličiny a jednotky[5]</i>	- 24 -
<i>Tabuľka 4.1: Zloženie atmosféry [17]</i>	- 34 -
<i>Tabuľka 7.1: Škody, ktoré môže spôsobiť svetlo oku a pokožke človeka[37]</i>	- 53 -
<i>Tabuľka 7.2: Rozdelenie tried laserov podľa výkonu a vlnovej dĺžky[16]</i>	- 54 -
<i>Tabuľka 7.3: Rozdelenie optického žiarenia</i>	- 55 -
<i>Tabuľka 7.4: Najvyššie prípustné hodnoty nekoherentného optického žiarenia</i>	- 56 -

Obsah

Úvod.....	- 19 -
1 Optika.....	- 20 -
1.1 História štúdie svetla	- 20 -
2 Popis svetelných technických veličín.....	- 22 -
2.1 Radiometrické veličiny	- 22 -
2.2 Fotometrické veličiny.....	- 23 -
3 Vláknová optická sieť	- 25 -
3.1 Šírenie svetla vo vlákne.....	- 25 -
3.2 Typy vláken.....	- 27 -
3.2.1 Multimódové vlákna.....	- 27 -
3.2.2 Jednomódové vlákna	- 27 -
3.2.3 Špeciálne typy vláken.....	- 27 -
3.3 Činitele ovplyvňujúce svetlo vo vlákne	- 28 -
3.3.1 Útlm.....	- 28 -
3.3.2 Ohyb	- 29 -
3.3.3 Disperzia.....	- 30 -
4 Bezvláknová optická sieť	- 32 -
4.1 Vonkajšia bezvláknová sieť	- 32 -
4.1.1 Činitele ovplyvňujúce svetlo vo vonkajšom prostredí	- 33 -
4.2 Vnútoraná bezvláknová sieť	- 34 -
4.2.1 Koncept vnútornej bezvláknovej optickej siete podľa viditeľnosti	- 34 -
4.2.2 Vnútoraná bezvláknová optická sieť podľa použitého spektra	- 35 -
4.2.3 Norma o osvetľovaní vnútorných priestorov.....	- 36 -
4.2.4 Činitele ovplyvňujúce svetlo vo vnútornom prostredí	- 37 -
4.2.5 IEEE 802.15.7: VLC	- 37 -
5 Optické prvky používané požívané v optických sieťach.....	- 39 -
5.1 Zdroje žiarenia.....	- 39 -
5.1.1 LED	- 39 -
5.1.2 Laser.....	- 39 -

5.2	Šošovky	- 39 -
5.2.1	Spojky.....	- 40 -
5.2.2	Rozptylky	- 40 -
5.2.3	Fresnelove šošovky	- 41 -
5.3	Difúzor	- 41 -
5.4	Filtre	- 41 -
5.5	Koncentrátory.....	- 42 -
5.5.1	Zobrazovacie koncentrátory	- 42 -
5.5.2	Nezobrazovacie koncentrátory	- 42 -
5.6	Kolimátory	- 43 -
6	Vysielače vo vnútorných bezvláknových optických sieťach	- 44 -
6.1	Optické vysielače vnútorných bezvláknových sietí s nepriamou viditeľnosťou.....	- 44 -
6.1.1	Konvenčný difúzny systém	- 44 -
6.1.2	Jednopásový viacväzkový vysielač	- 45 -
6.1.3	Viacpásový viacväzkový vysielač	- 45 -
6.1.4	Diamantový viacväzkový vysielač	- 46 -
6.2	Vysielače OW s priamou viditeľnosťou.....	- 46 -
6.3	Optické vlákno ako vysielač.....	- 47 -
6.3.1	Vyviazanie svetla pozdĺž vlákna	- 47 -
6.3.2	Vyviazanie svetla na konci vlákna	- 47 -
6.3.3	Vplyv zakončenia optických vlákien.....	- 47 -
6.4	Testované konfigurácie vysielačov vo vnútorných bezvláknových optických sieťach.....	- 49 -
7	Bezpečnosť žiarenia	- 51 -
7.1	Popis výkonových tried laserov	- 54 -
7.1.1	Trieda 1.....	- 54 -
7.1.2	Trieda 1M.....	- 54 -
7.1.3	Trieda 2.....	- 54 -
7.1.4	Trieda 2M.....	- 54 -
7.1.5	Trieda 3A.....	- 54 -
7.1.6	Trieda 3B.....	- 54 -

7.1.7	Trieda 4.....	- 55 -
7.2	Najvyššie prípustné hodnoty nekoherentného optického žiarenia	- 55 -
8	Simulácia a návrh optického vysielача na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools.....	- 57 -
8.1	Program LightTools	- 57 -
8.2	Postup simulácie.....	- 58 -
8.2.1	Vytvorenie optického vlákna.....	- 58 -
8.2.2	Zobrazenie objektu	- 61 -
8.2.3	Vysielač a naviazanie svetla do vlákien	- 62 -
8.2.4	Detektor	- 62 -
8.2.5	Odfiltrovanie svetla LED diód	- 64 -
8.2.6	Optimalizácia náklonu vlákien pre rovnomerné rozloženie na ploche detektoru.....	- 64 -
8.2.7	Spustenie simulácie	- 65 -
8.2.8	Tvorba optických zakončení pre vlákna	- 65 -
8.3	Výsledky simulácií.....	- 66 -
8.3.1	Simulácie vysielача zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1	- 67 -
8.3.2	Simulácie vysielача zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1.....	- 69 -
8.3.3	Simulácie vysielача zo 7 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1	- 70 -
8.3.4	Simulácie vysielача zo 7 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1	- 71 -
8.3.5	Simulácie vysielача z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1	- 72 -
8.3.6	Simulácie vysielача z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1	- 73 -
8.3.7	Simulácie vysielача z 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1	- 74 -
8.3.8	Simulácie vysielача z 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1	- 75 -
9	Experimentálne meranie optického vláknového vysielача pre VLC aplikácie	- 76 -
9.1	Príprava a postup.....	- 76 -

9.1.1	Výroba plošného spoja	- 76 -
9.1.2	Úprava optických vlákien	- 77 -
9.1.3	Tvorba zakončení optických vlákien	- 78 -
9.1.4	Uchytenie vysielacích vlákien	- 79 -
9.1.5	Prijímač	- 79 -
9.1.6	Výsledky meraní a ich porovnanie s výsledkami simulácií	- 80 -
9.1.7	Porovnanie výsledkov simulácií a experimentálneho merania LR LED	- 81 -
9.1.8	Porovnanie rozloženia výkonu pre kolmé a polgul'ové zakončenie	- 84 -
Záver		- 86 -
Použitá literatúra		- 88 -
Zoznam príloh		i

Úvod

Vývoj technológií a potreba prenosu veľkého objemu dát dospel k prenosu informácií najrýchlejšou formou akú poznáme, svetlom. Prenos svetla pomocou optických káblov už nie je v telekomunikáciách ničím výnimočným. Technológie výroby optických vlákien, a ďalších komponentov slúžiacich na prijímanie a odosielanie dát pomocou svetla, sú už na úrovni kedy je možné prenášať desiatky Gigabitov za sekundu. Oblasť, ktorá ešte nie je dostatočne rozvinutá, je bezdrôtová komunikácia. Rádiofrekvenčné pásmo podlieha v určitom rozsahu licenciám a postupne vyčerpáva svoje možnosti. Technológia, ktorá prináša mnohé výhody a podporuje požiadavku na mobilitu je práve prenos informácií pomocou svetla. Táto práca sa zaoberá práve optickým vláknovým vysielateľom, ktorý by mal slúžiť na prenos dát v bezvláknovej vnútornej optickej sieti a zároveň ožiarením definovanej plochy.

V prvej kapitole je vysvetlené, čo je to svetlo a je tu jednoducho zhrnutá história štúdie svetla. Nasleduje kapitola s popisom optických svetelných veličín, ktoré sa používajú na vyjadrenie energetických účinkov svetla. Rozdeľujú sa na radiometrické a fotometrické.

Tretia kapitola pojednáva o vláknovej optickej sieti, typoch používaných vlákien a najmä o šírení svetla vo vlákne pomocou odrazu a jeho naviazaní do optického vlákna. Tiež sú popísané činitele, ktoré nepriaznivo pôsobia na svetlo šíriace sa vo vlákne.

Vo štvrtej kapitole sú rozobrané bezvláknové optické siete. Rozdeľujeme ich na vonkajšie a vnútorné. Činiteľov, ktoré pôsobia na prenos svetla vo vonkajšom prostredí, je omnoho viac ako tých vo vnútri. Pri prenose v rámci miestnosti však nie sú prekonávané také veľké vzdialenosti.

Optické prvky, ktoré sa používajú v optických sieťach na prenos, príjem, vysielanie alebo úpravu svetla sú popísané v piatej kapitole.

V šiestej kapitole sú popísané konkrétnejšie typy vysielateľov použitých vo vnútorných bezvláknových optických sieťach. Existujú optické vysieláče, ktoré pracujú s priamou viditeľnosťou medzi vysielateľom a prijímačom, ale aj také, ktoré využívajú odrazy. Svetlo vyžaruje z optického vysielateľa prechodom cez difúzor, šošovky alebo optické vlákno, ktoré môže mať rôzne zakončenia.

Bezpečnosť zdravia pri vyžarovaní elektromagnetického žiarenia vo svetelnom spektre je popísaná v kapitole sedem. Ľudské zdravie je poškodené po vystavení sa svetlu v závislosti od výkonu a vlnovej dĺžky. Najviac vystavené riziku je oko a pokožka.

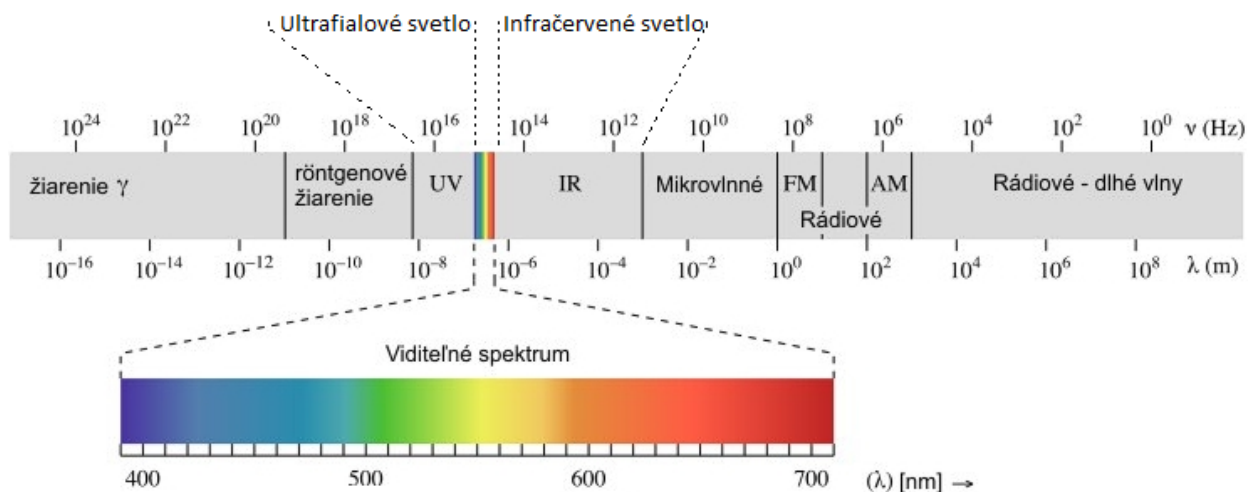
V ôsmej kapitole je popísaný softvér LightTools, postup simulácie optického vláknového vysielateľa a výsledky simulácií.

Posledná kapitola obsahuje postup, prípravu a výsledky experimentálneho merania.

1 Optika

Podľa doposiaľ nadobudnutých vedeckých poznatkov neexistuje nič, čo by malo väčšiu rýchlosť ako svetlo. Rýchlosť svetla označujeme c a vo vákuu má 299 792 458 metrov za sekundu. Preto aj najrýchlejším spôsobom prenosu informácií je prenos svetlom. Rýchlosť svetla sa mení na základe optickej hustoty prostredia. Označujeme ju ako index lomu. Index lomu je bezrozmerná veličina, ktorú označujeme n . Vo vákuu je index lomu 1 a napríklad vo vode 1,33. Vyjadruje v podstate spomalenie svetla v danej látke oproti vákuu vid' vzťah (1.1). Svetlo však nie je iba to, čo vidíme, ale celá časť neionizujúceho elektromagnetického žiarenia. Môžeme ho rozdeliť na ultrafialovú, viditeľnú a infračervenú časť tak, ako môžeme vidieť na obrázku 1.1.[1]

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)[2]$$



Obrázok 1.1: Spektrum elektromagnetického žiarenia

1.1 História štúdie svetla

Zákon lomu svetelných lúčov bol známy už v roku 300 pr. n. l. od Euklida. 150 rokov pr. n. l. sa ďalej lomom svetla zaoberal Ptolemaios. Už veľký grécky filozofovia ako Pythagoras, Demokritos, Platón a Aristoteles rozvíjali myšlienky o vzniku svetla. Približne v roku 1000 sa Alhazen zaoberal parabolickými a sférickými zrkadlami a popísal detailne ľudské oko. Ďalší vývoj je známy od holandského optika Lippersheyho a neskôr Galilea (1564–1642). Johannes Kepler (1571–1630) sa tiež zaoberal teleskopmi a objavil jav úplného vnútorného odrazu. V roku 1621 objavil profesor Willebrord Snell zákon lomu, ktorý Pierre de Fermat zovšeobecňuje na princíp najmenšieho času (1657), dnes známy ako Fermatov princíp. Profesor z Karlovej univerzity, Jan Mark Markov z Kronlandu (1595–1671), sa zaoberal spektrálnou analýzou a disperziou svetla. Ohyb svetla, teda difrakciu, prvý krát popísal profesor Grimaldi (1618–1663).

Interferenčné obrazce prvý pozoroval Angličan Hooke (1635–1703), ktorý tiež prišiel s teóriou, že svetlo je rýchly vibračný pohyb. Christian Huygens (1629–1695) presadzoval teóriu o svetle zloženom z viacerých farieb rovnako ako Isaac Newton v tej dobe alebo Jan Markov pred nimi. Huygens tiež objavil jav nazývaný polarizácia a to, že svetlo je v hustejšom prostredí spomalené. Dán Romer (1644–1710) prvý určil rýchlosť svetla pri pozorovaní mesiaca Io, ktorý obieha planétu Jupiter. V nasledujúcom období sa rozvíjala prístrojová a geometrická optika. Okolo roku 1800 došlo k objavom infračerveného a ultrafialového žiarenia. O rozvoj vlnových teórií sa zaslúžil Thomasem Young, Augustín Jean Fresnel, Joseph von Fraunhofer, neskôr Jean – Baptiste Joseph Fourier a Gustav Robert Kirchhof dali vlnovej optike matematický základ. Prvé určenie rýchlosti svetla na Zemi vykonali Fezeau (1819–1896) s Foucaltom (1819–1868) v roku 1849 s výsledkom 315 300 km/s. V roku 1845 Faraday (1791–1867) dokázal vzťah medzi elektromagnetizmom a svetlom. Tiež zistil, že v magnetickom poli môžeme zmeniť polarizáciu svetla. Clark Maxwell (1831–1879) zostavil matematické rovnice, ktoré popisujú elektromagnetické pole. V roku 1888 Heinrich Hertz (1857–1894) dokázal existenciu elektromagnetických vĺn. Michelson (1852–1931) experimentálne a neskôr Albert Einstein (1879–1955) teoreticky dokázali, že svetlo sa šíri aj vo vákuu. V roku 1900 prišiel Max Planck (1858–1947) s myšlienkou kvantovania, ktorá stála na počiatku kvantovej teórie, Túto myšlienku rozvíjali fyzici 20. storočia. Niels Henrik David Bohr (1885–1962) určil kvantové hladiny atómu a predpovedal väzbu emisie a vlnovej dĺžky. V roku 1954 Američan J. P. Gordon, Ch. Townes a H. J. Zeiger experimentálne potvrdili existenciu stimulovanej emisie. V tomto období bol tiež zostrojený mikrovlnný kvantový zosilňovač a potom generátor MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sovietskimi N. G. Basovom a A. M. Prochorovom V roku 1958 vedci Townes a Schawlow vytvorili teoretický rozbor kvantových generátorov a navrhli Fabry – Perotov rezonátor, ktorý zostavil T. H. Maiman. V roku 1961 bol vyvinutý laser na báze hélia a neónu, čo viedlo k základom laserovej optiky. Základy koherentného žiarenia položil A. S. Popov a O. N. Krochin, ktorí skúmali PN prechod. Neskôr nastal veľký rozvoj nových druhov laserov, integrovanej optiky, optoelektroniky, vláknovej optiky. Tak, ako aj u integrovanej elektroniky, tak aj u integrovanej optiky vedie vývoj k miniaturizácii. [3]

2 Popis svetelných technických veličín

Svetlo, ktoré môžeme popisovať ako elektromagnetické vlnenie, nesie určitú energiu. Túto energiu môžeme popísať takzvanými rádiometrickými a fotometrickými veličinami. V optike sa používajú meracie zariadenia, ktoré merajú energetické účinky. Rádiometrické veličiny popisujú energiu celého svetelného spektra. Fotometrické veličiny sú obmedzené na vlnové dĺžky 360 až 830 nm, ktoré zodpovedajú svetlu s účinkami detekovateľnými okom. Každá fotometrická veličina zodpovedá rádiometrická veličina, čo môžeme vidieť v tabuľke 2.1. Vzťah týchto jednotiek nezávisí na jednotkách veličín ale na zložení spektra svetla.[4]

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Názov	Jednotka	Názov	Jednotka
žiarivý tok Φ_e	W; J	svetelný tok Φ	lumen [lm]
žiarivosť I_e	$W \cdot sr^{-1}$	svietivosť I_y	kandela [cd]
žiar, plošná žiarivosť (jas) L_e	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	jas L	$cd \cdot m^{-2}$
intenzita vyžarovania M_e	$W \cdot m^{-2}$	svetlenie (intenzita svetlenia) M	$lm \cdot m^{-2}$
intenzita ožiarenia E_e	$W \cdot m^{-2}$	osvetlení (intenzita osvetlenia) E	[lux; lx]
expozícia H_e	$W \cdot s \cdot m^{-2}$	expozícia (osvit) H	$lx \cdot s$

Tabuľka 2.1: Príbuznosť rádiometrických a fotometrických veličín[5]

2.1 Rádiometrické veličiny

Energiu prenášanú elektromagnetickým žiarením nazývame žiarivá energia. Žiarivá energia obsiahnutá v jednotke objemu je tzv. objemová hustota žiarivej energie. Táto veličina je sklárna.[5]

Základnou charakteristikou spektra svetelnej energie je spektrálna objemová hustota žiarivej energie. Je to energia v jednotke objemu v určitom intervale vlnových dĺžok.[5]

Žiarivý tok je množstvo žiarivej energie prenesené za jednotku času. Túto veličinu označujeme aj výkon a to najmä v laserovej fyzike a teórii elektromagnetického poľa.[5]

Intenzita žiarenia alebo plošná hustota žiarenia je veličina definujúca energiu prenášanú v danom bode priestoru. Toto množstvo energie je vzťahované na jednotku času a jednotku plochy priestoru.[5]

Ak chceme pre intenzitu žiarenia definovať spektrálnu oblasť, takúto veličinu nazývame spektrálna intenzita alebo plošná hustota spektrálneho žiarivého toku.[5]

Rádiometrické veličiny, ich jednotky a definície z normy ČSN 01 1306 sú zhrnuté v tabuľke 2.2.

Popis svetelných technických veličín

Veličina	Značka	Jednotka	Vzorec
žiarivá energia	$Q_e (E)$	J	$\int_0^t \Phi_e dt$
žiarivý tok	Φ_e	W; J	$\frac{dE}{dt}$
žiarivosť	I_e	$W \cdot sr^{-1}$	$\frac{d\Phi_e}{d\Omega}$
žiara, plošná žiarivosť (jas)	L_e	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$\frac{dI_e}{ddS \cos \nu \Omega}$
plošná hustota	φ_e	$W \cdot m^{-2};$ $W; W \cdot m^2]$	$\frac{d\Phi_e}{dSn}$
intenzita vyžarovania	M_e	$W \cdot m^{-2}$	$\frac{d\Phi_e}{dS}$
intenzita ožiarenia	E_e	$W \cdot m^{-2}$	$\frac{d\Phi_e}{dA}$
expozícia	H_e	$W \cdot s \cdot m^{-2}$	$\bar{E}_e \cdot t$

Tabuľka 2.2: Rádiometrické veličiny a jednotky[5]

2.2 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny sú zastaralé veličiny slúžiace na meranie výkonových vlastností viditeľného optického žiarenia. Vzťahujú sa ku spektrálnej citlivosti ľudského oka a sú odvodené od porovnávacích pozorovaní nekoherentných polí ľudským okom. [5]

Svetelný tok vyjadruje schopnosť žiarivého toku vyvolať zrakový vnem. [5]

Svietivosť vyjadruje schopnosť bodového zdroja vyvolať v určitom danom smere zrakový vnem. [5]

Jas je určený podielom svietivosti elementárnej plochy s určitým obsahom vo zvolenom smere α a kolmého priemeru plochy v tomto smere. [5]

Svetlenie alebo intenzita svetlenia žiarenia je podiel svetelného toku vysielaného danou plochou $d\varphi$ a plochy polopriestoru dS , do ktorého je svetlo vysielané. [5]

Osvetlenie, intenzita osvetlenia je podiel svetelného toku vysielaného danou plochou $d\varphi$ a plochy priestoru dA na, ktorú svetelný tok dopadá. [5]

Osvit resp. expozícia je plošná hustota svetelného množstva, ktoré dopadlo na danú plochu v určitom časovom intervale. Inak povedané, je to súčin stredného osvetlenia a doby t , počas, ktorej osvetlenie pôsobí. [5]

Popis svetelných technických veličín

Fotometrické veličiny, ich jednotky a definície z normy ČSN 01 1306 sú zhrnuté v tabuľke 2.3.

Veličina	Značka	Jednotka	Vzorec
svetelné množstvo	Q	$lm \cdot s$	$\int_0^t \Phi dt$
svetelný tok	Φ	lumen [lm]	$\frac{dE}{dt}$
svietivosť	I	kandela [cd]	$\frac{d\Phi_e}{d\Omega}$
jas	L	$cd \cdot m^{-2}$	$\frac{dI}{dS \cdot \cos v}$
svetlenie (intenzita svetlenia)	M	$lm \cdot m^{-2}$	$\frac{d\Phi_e}{dS}$
osvetlenie (intenzita osvetlenia)	E	lux; lx	$\frac{d\Phi_e}{dA}$
expozícia (osvit)	H	$lx \cdot s$	$\bar{E} \cdot t$

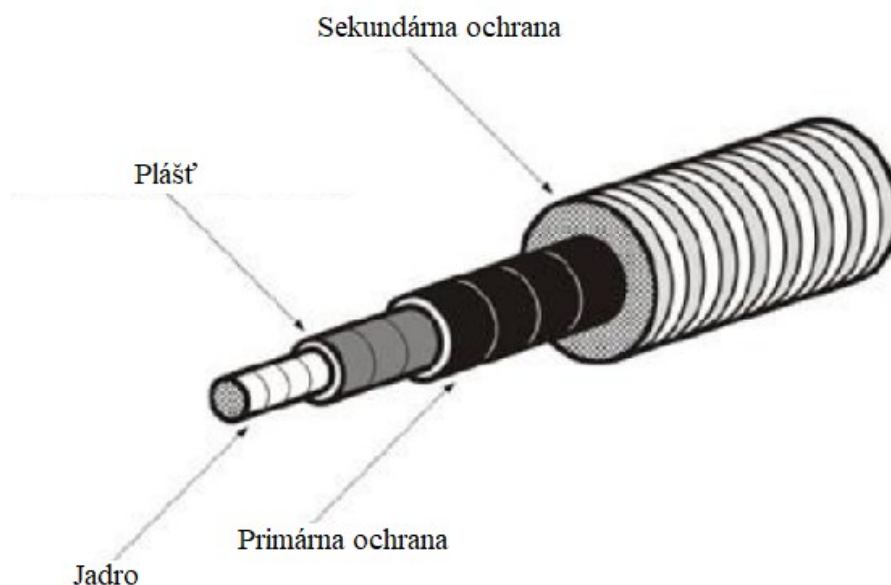
Tabuľka 2.3: Fotometrické veličiny a jednotky[5]

3 Vlákňová optická sieť

Pri neustále sa zvyšujúcich nárokoch na objem prenesených dát prestávajú metalické a rádiové siete stačiť. Prenos dát optickými vláknami má množstvo výhod. Okrem šírky pásma je to aj odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu, vlákna sú tiež tenšie a ľahšie ako drôty a majú väčší dosah. Pretože krátkovlnné elektromagnetické žiarenie sa na časticách ako kvapky vody rozptýli na rozdiel od rádiových vln tak svetlo potrebuje vodič, ktorý nebude takto ovplyvňovaný. Riešením sú optické káble vyrobené z kremičitého skla alebo plastu. Čistota skla prvého transatlantického optického kábla položeného v roku 1988 umožňovala umiestnenie zosilňovačov vo vzdialenosti 60 km od seba. Technológie výroby optických vlákien prešli samozrejme vývojom, zlepšili sa parametre vlákien a používajú zosilňovače bez elektro-optickej konverzie.

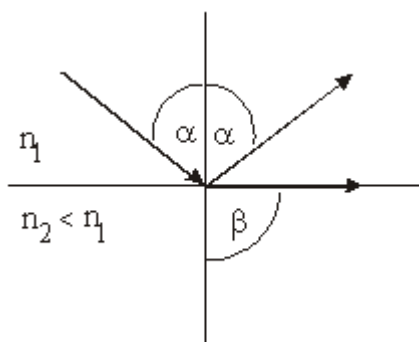
3.1 Šírenie svetla vo vlákne

Svetlo sa šíri vo vláknach pomocou takzvaného úplného resp. totálneho odrazu. Aby nastal úplný odraz, musí byť splnený medzný uhol dopadu a podmienka, že svetlo musí naraziť na rozhranie prostredí z opticky hustejšieho prostredia do opticky redšieho prostredia. Preto musí byť vlákno tvorené minimálne dvomi časťami. Jadrom a obalom. Jadro má vždy väčší index lomu ako plášť pre splnenie podmienky úplného odrazu. Vyrábajú sa z opticky čistých materiálov ako je oxid kremičitý SiO_2 alebo rôzne druhy plastov. V praxi majú optické vlákna okrem jadra a plášťa ešte primárnu a sekundárnu ochranu. Primárna ochrana slúži na zvýšenie odolnosti vlákna proti poškodeniu, ohybom a vlhkosti. Sekundárna ochrana slúži ako ochranný plášť na mechanickú ochranu vlákna, ale nie vždy sa používa kvôli tomu, že zväčšuje priemer vlákna - vid'. obr. 3.1.[6]



Obrázok 3.1: Časti optického vlákna[6]

Medzný uhol, ktorý vyjadruje veľkosť uhla, ktorý nesmie byť presiahnutý pre dosiahnutie úplného odrazu je odvodený od Snellovho zákona, vyjadreného vo vzťahu (3.1), ktorý vyjadruje súvislosť uhla dopadu a uhla odrazu na indexe lomu prostredia, z, ktorého lúč dopadá a na indexe lomu prostredia, na, ktoré lúč dopadá resp. do ktorého prechádza. Medzný uhol, vid' vzťah (3.2), nastáva vtedy, keď je uhol α taký, že uhol β je 90 stupňov - vid' obr. 3.2. V tomto prípade sa svetlo šíri na rozhraní dvoch prostredí a nedochádza k prechodu svetla do druhého prostredia. Pri ďalšom zväčšovaní uhlu alfa prekonáme tento medzný uhol a nastane úplný odraz.



Obrázok 3.2: Medzný uhol, odraz svetla[1]

Snellov zákon:

$$\sin \alpha \cdot n_1 = \sin \beta \cdot n_2 \quad (3.1) [7]$$

Medzný uhol α odvodený zo Snellovho zákona:

$$\sin \alpha \cdot n_1 = \sin 90^\circ \cdot n_2$$

$$\sin \alpha \cdot n_1 = 1 \cdot n_2$$

$$\sin \alpha \cdot n_1 = 1 \cdot n_2$$

$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) [^\circ] \quad (3.2)[7]$$

Numerická apertúra je parametrom optického vlákna, ktorý označujeme NA. Vyjadruje schopnosť vlákna prijať a viesť optické žiarenie. Jej veľkosť vyjadruje sínus uhla θ pod ktorým vlákno ešte naviaže svetlo. Závisí na pomere indexu lomu jadra a plášťa - vid'. vzorec (3.3). Čím je hodnota NA väčšia, tým je väčšia schopnosť vlákna naviazať svetlo. V prípade jednomódového vlákna súvisí NA s normalizovanou frekvenciou, ktorú označujeme V. Normalizovaná frekvencia nesmie prekročiť hodnotu 2,405 na to, aby sa vláknom šírila iba jeden lúč. Je priamo závislá na priemere jadra a NA a nepriamo závislá na vlnovej dĺžke svetla vid'. vzorec (3.4).

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.3)[1]$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot NA \quad (3.4)[1]$$

3.2 Typy vláken

Najzákladnejšie rozdelenie vláken je na jednomódové a multimódové. Inak nazývané aj jednovidové a mnohovidové. Toto rozdelenie je podľa počtu módov, ktoré sú vedené vláknom. Pre prenos sa používa vlnová dĺžka 1310 nm, pretože pri tejto hodnote má sklo najnižšie hodnoty disperzie a 1550 nm, pretože tu má sklo najnižšie hodnoty útlmu.

3.2.1 Multimódové vlákna

Vyznačujú sa veľkým priemerom. Zvyčajne 50 alebo 62,5 μm jadro a 125 μm plášť. Kvôli veľkému priemeru jadra vlákna sa svetelné lúče šíria rôznymi dráhami. Prejdú preto rozdielne dlhé trasy a tým pádom dorazia na koniec vlákna v rôznych časoch, čo spôsobuje rozťahnutie svetelného signálu. Tieto typy vláken sa preto používajú iba na krátke vzdialenosti. Ich výhodou je jednoduchšia manipulácia a jednoduchšie naviazanie svetla. Tiež sú pri tomto type vlákna menšie straty v prípade ohybu a spojov. Špeciálnym prípadom multimódových vláken sú multimódové vlákna s gradientným indexom lomu. Jedná sa o jadro vlákna, ktorého index lomu nie je konštantný, ale mení sa so vzdialenosťou od osi vlákna. Má gradientný profil. Módy, ktoré majú dlhšiu trasu pri prechode optickým vláknom prechádzajú častejšie časťou vlákna s nižším indexom lomu, čo spôsobí rýchlejší prenos ako pre módy prechádzajúce najmä oblasťou s vyšším indexom lomu. Kompenzujú tak módovú disperziu. Dá sa povedať, že svetlo sa v takýchto vláknach vďaka gradientnej zmene indexu lomu šíri ohybom namiesto lomom svetla.

3.2.2 Jednomódové vlákna

Prenášajú iba jeden mód. Tým sa zamedzuje vzniku módovej disperzie. Pre splnenie prenášania iba jedného vidu musí byť splnená hodnota normalizovanej frekvencie. Obvyklá veľkosť jednovidových vláken je 8 μm pre jadro a 125 μm pre plášť. Vyznačujú sa vysokými prenosovými rýchlosťami, nízkym útlmom, prenosom na vzdialenosti desiatok až 100 km a kvôli malým rozmerom náročnosťou navádzania svetla a spájania takýchto vláken.

3.2.3 Špeciálne typy vláken

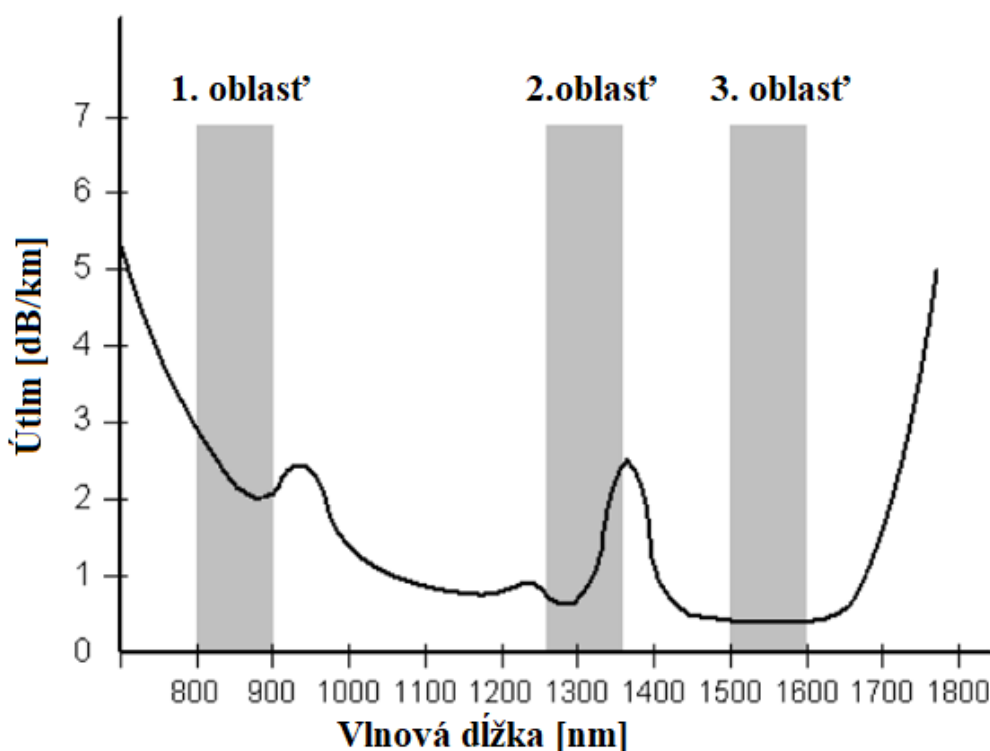
Spadajú sem napríklad optické vlákna s rôznymi prímiesami, ktoré sa využívajú v senzorike. Tiež sa používajú vlákna slúžiace ako filtre alebo zosilňovače ako aj všetky nekonvenčné vlákna, ktoré sa odlišujú najmä veľkosťou a druhom materiálu.

3.3 Činitele ovplyvňujúce svetlo vo vlákne

3.3.1 Útlm

Útlm signálu je pokles výkonu vstupného signálu na hodnotu výstupného signálu. Jeho hodnota je vyjadrená v decibeloch - vid'. vzorec 3.5. Spôsobujú ho nehomogenity na trase, rozptyl, absorpcia, ohyby a v podstate všetky súčiastky na trase vrátane optického vlákna. Vlnové dĺžky svetla, ktoré sa dnes používajú boli zvolené práve kvôli útlmovej charakteristike kremenných optických vlákien. V okolí vlnových dĺžok 850, 1300 a 1550 nm sa nachádzajú oblasti, ktoré majú najnižšiu mieru rozptylu a absorpcie v tomto materiáli a teda najnižší útlm - vid' obr. 3.3. Absorpcia je silno spektrálne závislá.

$$A = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \text{ [dB]} \quad (3.5)[3]$$

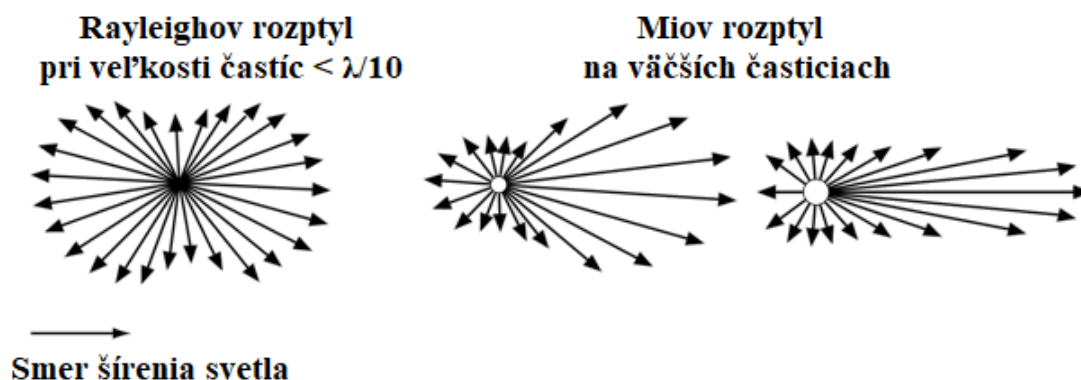


Obrázok 3.3: Útlmová charakteristika kremenného vlákna

- **Materiálová absorpcia** je zapríčinená interakciou svetla s atómami materiálu vlákna. Elektromagnetická energia je materiálom pohltená a mení sa na tepelnú. V prípade jednomódového vlákna je nižšia z dôvodu menšieho objemu materiálu. Nemôže byť eliminovaná.[9]
- **Prímesová absorpcia** je spôsobená nečistotami v materiáli. Najmä OH iónmi. Môžeme ju eliminovať pri výrobnom procese snahou o čo najväčšiu čistotu materiálu bez iónov kovov a vody.[9]

Rozptyľové straty vznikajú tak, že molekuly materiálu tvoria mikronehomogenity indexu lomu. Rozptyľ môže byť lineárny alebo nelineárny.

- **Lineárny rozptyľ** delíme ďalej na Rayleighov a Mieho. Jeho rozptýlené svetlo má rovnakú vlnovú dĺžku, ako svetlo, ktoré dopadá na rozptyľujúci prvok. Rayleighov rozptyľ je vo vlákne spôsobený nehomogenitami menšími ako vlnová dĺžka svetla a tepelným dôsledkom pohybu molekúl. Závisí na vlnovej dĺžke a svetlo sa rozptyľuje do všetkých strán vid' obr. 3.4. Mieho rozptyľ je spôsobený nehomogenitami, ktoré sú porovnateľne veľké alebo väčšie ako vlnová dĺžka svetla, ktoré je rozptyľované. Spôsobujú ho nečistoty vo vlákne a na trase.[1]
- **Nelineárny rozptyľ** delíme na Ramanov a Brillou. Svetlo má po rozptýlení inú vlnovú dĺžku. Tieto rozptyly sa prejavujú najmä pri vysokom optickom výkone. Brillou rozptyľ nastáva pri interakcii elektromagnetickej vlny napríklad s akustickou vlnou. Akustická vlna spôsobí deformáciu prostredia v čase. V optických vláknach majú tepelné vibrácie molekúl vplyv na vznik akustických vln.[8] Ramanov rozptyľ nastáva vplyvom pohybu atómov medzi základným, vibračným a virtuálnym stavom. Ak molekula klesá z virtuálneho stavu do vibračného stav, energia fotónu sa zmenší a vlnová dĺžka sa zväčší. Ak molekula prechádza pri rozptyle z vibračného stavu do základného, tak má rozptýlený fotón väčšiu energiu a kratšiu vlnovú dĺžku ako dopadajúci fotón.[10]



Obrázok 3.4: Spektrum elektromagnetického žiarenia[16]

3.3.2 Ohyb

Pri ohybe vlákna sa zmení uhol odrazu pre lúč putujúci vláknom a tým sa poruší podmienka pre úplný odraz alebo nastane neželaná zmena odrazu.

- **Makroohyb** je spôsobovaný potrebou manipulovať s vláknom. Závisí najmä na priemere vlákna a použitej vlnovej dĺžke. Z tohto dôvodu sú najviac náchylné na ohyb

jednomódové vlákna. Pri presiahnutí povoleného ohybu sa zmení uhol, pod ktorým dopadá lúč na rozhranie - vid' obr. 3.5.[11]



Obrázok 3.5: Ohyb vlákna [3]

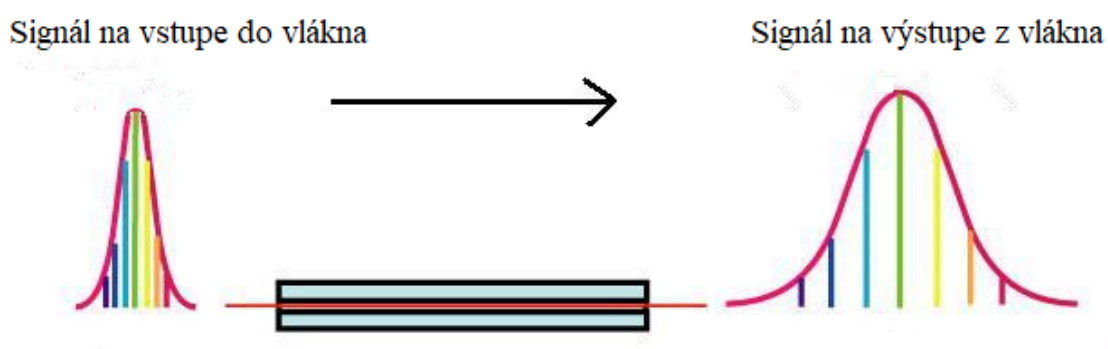
- **Mikroohyby** sú spôsobené nedokonalosťou výroby, kedy nebol vyrobený dokonalý geometrický tvar, teda dokonale hladká stena jadra a plášťa. Taktiež môže byť spôsobený vplyvmi, ktoré mechanicky pôsobia na vlákno či už tlakom alebo napätím alebo teplotným namáhaním. Nemajú taký silný vplyv na útlm ako makroohyby, pokiaľ sa ich nevyskytuje na trase príliš mnoho. Ich výskyt je náhodný.[9]

3.3.3 Disperzia

Disperzia je jav, ktorý mení tvar vysielačného pulzu na trase vláknom. Na konci vlákna tak má pulz deformovaný tvar. Má zmenenú amplitúdu, je roztiahnutý alebo dokonca zliaty s iným pulzom. Kvôli disperzii musíme skrátiť vzdialenosť prenosu alebo zvýšiť odstup jednotlivých pulzov, teda znížiť prenosovú rýchlosť. Pri použití mnohovládového vlákna sú oproti módovej disperzii ostatné typy disperzií zanedbateľné.

- **Módová disperzia** Inak nazývaná aj vidová alebo vlnová disperzia; má najväčší vplyv na zmenu tvaru vstupného pulzu. Je spôsobená šírením lúčov rôznymi trasami. Prechod lúčov rôzne dlhými trasami trvá rôzne dlhú dobu a preto lúče nedorazia v rovnaký čas, čo spôsobí roztiahnutie pulzu. Dá sa kompenzovať použitím laseru s úzkym spektrom alebo jadróm vlákna s gradientným profilom indexu lomu. Úplne ju môžeme odstrániť použitím jednomódového vlákna.[1]
- **Chromatická disperzia** Je spôsobená závislosťou indexu lomu na vlnovej dĺžke vid' obr. 3.6. Každý rozdiel vlnovej dĺžky preto zapríčiní inú rýchlosť šírenia svetla.

Kompenzujeme ju použitím zdroja svetla s čo najužším spektrom vlnovej dĺžky. Aj to najužšie spektrum vyžiareného spektra však obsahuje teoreticky nekonečný počet vlnových dĺžok. Rozdiel medzi jednotlivými rýchlosťami vlnových dĺžok pulzu šírenia svetla spôsobí zmenu tvaru pulzu prechodom vlákna. Chromatickú disperziu môžeme rozdeliť na materiálovú, vlnovodnú a profilovú. Materiálová je spôsobená práve rôznymi vlnovými dĺžkami svetla šíriacimi sa jadrom vlákna a vlnovodná je spôsobená tým, že časť svetla sa šíri nielen jadrom ale aj plášťom vlákna. Keďže má plášť optického vlákna iný index lomu ako jadro, optický signál bude ovplyvnený inou rýchlosťou šírenia svetla v jadre a v plášti. Profilová disperzia je daná závislosťou profilu indexu lomu kde sa líšia disperzné vlastnosti. Celková chromatická disperzia je súčtom materiálovej, vlnovodnej a profilovej disperzie.[12] [13]



Obrázok 3.6: Chromatická disperzia [12]

- **Polarizačne vidová disperzia** Táto disperzia je zapríčinená nedokonalosťou geometrického tvaru vlákna. Kvôli tomu, že obvod nie je vždy presný kruh, ale môže byť napríklad sploštený do tvaru elipsy spôsobí táto nesymetria spôsobená pri výrobe alebo ohybe zmenu rýchlosti šírenia jednotlivých polarizácií svetla. Polarizácie svetla sa v podstate navzájom posunú a tak sa posunie i energia, ktorú nesú, čo spôsobí zmenu tvaru výsledného pulzu. Napriek tomu, že táto disperzia ovplyvňuje optický signál najmenej spomedzi disperzií, je dnes najväčším limitujúcim faktorom prenosovej rýchlosti kvôli schopnosti kompenzovať chromatickú disperziu. [13]

4 Bezvláknová optická sieť

Absolútna väčšina bezdrôtových komunikačných technológií je v dnešnej dobe realizovaná pomocou rádiových vln. Sú to už známe technológie ako napríklad Bluetooth, Wi-fi, Zigbee, GSM, UMTS, LTE a DVB-T, ktoré pokrývajú elektromagnetické spektrum od 3 Hz do 300 GHz, ako sme mohli vidieť na obrázku 1.1.[14] Mnohé frekvencie z tohto rozsahu sú vyhradené pre ozbrojené zložky, medicínsku techniku, záchranné oddiely a podobne. Taktiež sú niektoré frekvenčné pásma licencované, takže použitie daných frekvencií nie je zadarmo. Preto je možnosť použiť na bezdrôtový prenos frekvencie svetla oblasťou, ktorá má oproti rádiovým vlnám viacero výhod. Riešenia prenosu dát pomocou svetla riešia nedostatočnú kapacitu prenosových kanálov, energetickú náročnosť i efektivitu a taktiež bezpečnosť.[15]

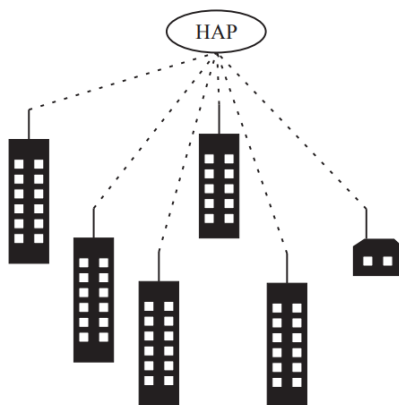
4.1 Vonkajšia bezvláknová sieť

Vonkajšie optické spoje sa delia podľa polohy vysielača a prijímača na horizontálne a vertikálne. Takéto spoje sú realizované najčastejšie v mestskej zástavbe. To súvisí s útlmom, ktorý je zvýšený okrem atmosférických poveternostných podmienok ako dážď, sneh a hmla aj smogom, preletom vtákov a turbulenciami. Viac o faktoroch útlmu v kapitole 3.3. Horizontálne spoje sa štandardne inštalujú na stabilné objekty vo vzdialenostiach do 500 m ale existujú aj spoje s prijateľnou chybovosťou do 10 km. Horizontálne spoje sa používajú najmä v prípadoch, kedy nie je možné spojenie pomocou vlákna. Model takéhoto spojenia môžeme vidieť na obr. 4.1



Obrázok 4.1: Model horizontálneho optického spoja[16]

V prípade vertikálnych spojov sa jedná o vzdialenosť niekoľko desiatok km. Spojenie v tomto prípade prebieha medzi pozemnou stanicou a výškovou stanicou, takzvanou HAP (High Altitude Platform). Vertikálne optické spoje čelia oproti horizontálnym ďalším úskaliam. Jedná sa napríklad o omnoho vyššiu mieru termických turbulencií, rozptyl na molekulách ozónu vo výške 18 až 30 km nad zemským povrchom a o rýchlosť pohybu zeme po obežnej dráhe v prípade komunikácie so satelitom. Síce už existujú realizované projekty optickej satelitnej komunikácie, stále tu prevládajú rádiové spoje. Model vertikálneho spojenia je zobrazený na obr. 4.2 [16]



Obrázok 4.2: Model vertikálneho optického spoja[16]

4.1.1 Činitele ovplyvňujúce svetlo vo vonkajšom prostredí

Vo vonkajšom prostredí ovplyvňujú svetlo rovnaké faktory ako uvádzam v kapitole 3.3, samozrejme s výnimkou ohybu vlákna. Sú však zanedbateľné v porovnaní s vplyvmi atmosféry. Prenosovým médium je vzduch, ktorý je zložený väčšinou z plynov. Zloženie pri teplote 23°C , 0 m.n.m. a tlaku 101 KPa možno vidieť v tab. 4.1. V atmosfére sa nachádzajú však aj aerosóly, najmä molekuly vody čo značne prispieva k vysokej miere spektrálnej závislosti svetla pri prenose vzduchom. Atmosféra je nestacionárne a nehomogénne prostredie. Jej vlastnosti sa menia v súvislosti s časom i geografickou polohou. S nadmorskou výškou sa mení teplota, tlak i jej zloženie. Najväčší vplyv na prenos svetla majú atmosférické javy ako dážď, sneh, krúpy, hmla alebo smog a slnko. Z rozptylov má najväčší vplyv Rayleighov rozptyl, ktorý zapríčiňuje aj modrú farbu oblohy tým, že krátka vlnová dĺžka modrého svetla je viac rozptýlená ako dlhšia vlnová dĺžka červeného svetla. Nasleduje Mieov rozptyl. Ďalším faktorom ovplyvňujúcim svetlo v atmosfére sú turbulencie. Turbulencie vznikajú narážaním a prúdením vzduchu okolo objektov ako sú stromy, skaly, budovy atď. Nazývame ich mechanické turbulencie. Druhým prípadom sú tzv. termické turbulencie, ktoré vznikajú v dôsledku rozdielnych teplôt vzduchu a okolia. Teplejší vzduch má menšiu hustotu ako studený a preto stúpa vyššie, kým chladnejší vzduch klesá. V prípade vplyvu ostatného svetla má popri lúčoch zo slnka vplyv aj ich odraz od mrakov a povrchu zeme. Odrazivosť sa mení najmä pri napadaní snehu. [16]

Molekuly	Koncentrácia
dusík (N ₂)	78,08 %
kyslík (O ₂)	20,95 %
argón (Ar)	934 ppm
oxid uhličitý (CO ₂)	400 ppm
neón (Ne)	18,18 ppm
hélium (He)	5,24 ppm
metán (CH ₄)	01,7 ppm
kryptón (Kr)	1,14 ppm
vodík (H ₂)	0,55 ppm
voda (H ₂ O)	0,2-4 %

Tabuľka 4.1: Zloženie atmosféry [17]

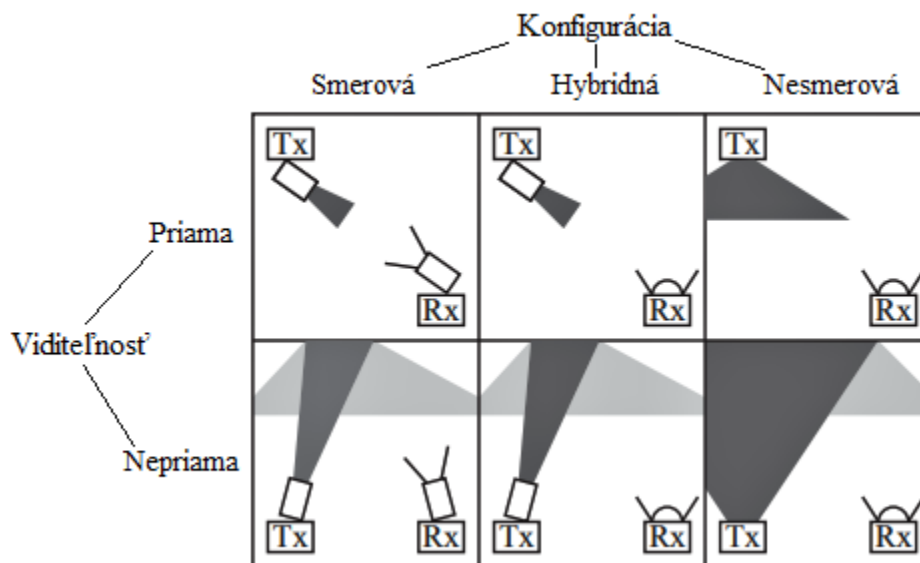
4.2 Vnútná bezvláknová sieť

Na rozdiel od vonkajších bezvláknových optických sietí sa vo vnútorných priestoroch používa ako zdroj svetla LED. Keďže LED začali v mnohých prípadoch nahrádzať zvyčajné prostriedky na osvetlenie ako sú žiarovky a žiarivky, je možné ich využívať ako zdroj žiarenia pre komunikačné účely a zároveň pre účel osvetľovania. Výhodou vnútorných bezvláknových optických sietí, je nízka miera atmosférických vplyvov. V niektorých článkoch sa vnútorná bezvláknová optická sieť označuje OW (Optical Wireless). [18]

4.2.1 Koncept vnútornej bezvláknovej optickej siete podľa viditeľnosti

Na základe priamej viditeľnosti medzi vysielačom a prijímačom rozdeľujeme OW na tie s priamou viditeľnosťou a s nepriamou. V prípade priamej viditeľnosti sa maximalizuje energetická účinnosť a minimalizuje sa skreslenie spôsobené viaccestným šírením. Nevýhodou však je znížená možnosť mobility a nemožnosť prekážky medzi vysielačom a prijímačom. V prípade nepriamej viditeľnosti sa vyžaduje vyšší výkon prijímača aj vysielača, pretože využíva svetlo odrazené od okolitých objektov. Takéto systémy sú robustnejšie, pretože podporujú mobilitu a prekážky nemusia znamenať prerušenie spojenia. Nevýhodou však sú optické straty, mnohocestný rozptyl a nižšia prenosová rýchlosť. V oboch prípadoch môžeme konfiguráciu OW rozdeliť na smerovú, hybridnú a nesmerovú podľa smerovosti. V smerovej konfigurácii je vysielač aj prijímač nastavený na určitý smer, v ktorom bude vysielať vysoko smerovo a prijímať v úzkom zornom poli. Hybridná konfigurácia má vysielač alebo prijímač so širokým zorným uhlom. Spravidla je to prijímač. Nesmerová konfigurácia je tá, v ktorej je vysielač nesmerový,

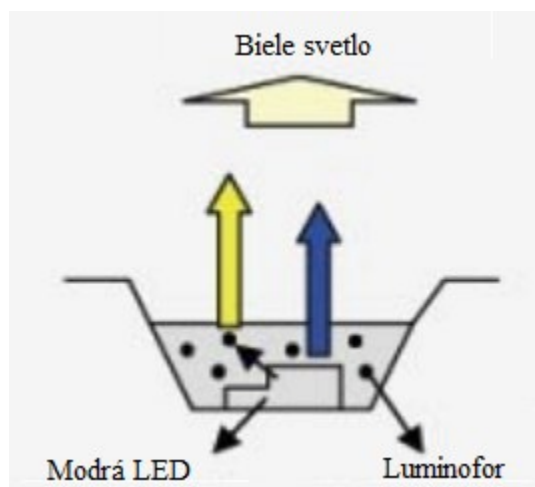
teda vysiela do širokého uhla a prijímač má široké zorné pole. Ilustráciu týchto konfigurácií je možné vidieť na obr. 4.3. [19]



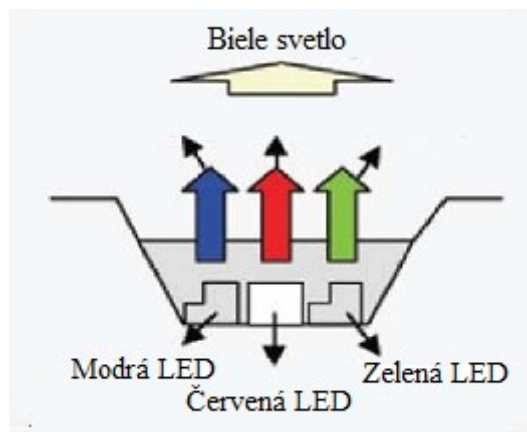
Obrázok 4.3: Koncepty OW komunikácií[16]

4.2.2 Vnútna bezvláknová optická sieť podľa použitého spektra

Najčastejšie sa používa infračervené svetlo vlnovej dĺžky 850, 950, 1300, 1480 a 1550 nm a viditeľné svetlo vlnovej dĺžky 380 až 780 nm označované aj VLC (Visible Light Communication). Prenos infračerveným svetlom je historicky najviac preštudovaný aj používaný. Vďaka nízkej energetickej náročnosti a dostatočnej prenosovej rýchlosti začal byť prenos infračerveným svetlom používaný na ovládanie televízora.[20] Ako zdroj žiarenia sa používa LED. LED vyžaruje vysoký výkon na malej ploche, čo je nebezpečné pre zdravie človeka, preto sa nepoužívajú pre OW. S narastajúcimi požiadavkami na ekológiu a znižovanie energetických nárokov sa naskytuje možnosť využiť LED diódy nielen na komunikáciu ale zároveň aj na osvetľovanie a zlúčiť tak tieto funkcie. Zlúčenie takejto funkcionality by bolo možné nielen vo vnútri budov, ale aj v prípade automobilov, verejného osvetlenia, semaforov a podobne.[11] Biele svetlo, ktoré je vhodné na osvetľovanie aj komunikáciu, keďže obsahuje takmer všetky vlnové dĺžky viditeľného spektra sa udáva farebnou teplotou v Kelvinoch. Biele svetlo vieme vytvoriť pomocou LED, ktorá má LED čip vyžarujúci modrú vlnovú dĺžku 450 nm a je pokrytý vrstvou žltého luminoforu vid' obr. 4.4. Ako luminofor sa využíva YAG (Yttrium, Aluminium, Garnet) alebo Yttrito-hlinitý granát ($Y_3Al_5O_{12}$). Tento luminofor yttrium granát hliníku sa dotuje Cérom (Ce). Vznikne tak luminofor s označením $Y_3Al_5O_{12}:Ce_3$ (YAG:Ce). Keďže luminiscencia má určitú dobu dohasínania, tak použitie tohto typu LED obmedzuje rýchlosť možnej modulácie svetla. Jej výroba je však lacnejšia. Druhou možnosťou ako vytvoriť biele svetlo je použiť kombináciu modrej diódy, červenej diódy a zelenej alebo použitím zeleného luminoforu (Tri-chromatické biele svetlo) vid' obr. 4.5. Takéto diódy sú drahšie a energeticky náročnejšie ale môžu dosahovať vyšších prenosových rýchlostí. [4]



Obrázok 4.4: LED s luminoforom[22]



Obrázok 4.5: Zložená LED[22]

4.2.3 Norma o osvetľovaní vnútorných priestorov

Keď chceme využívať na komunikáciu viditeľné svetlo, ktoré má slúžiť zároveň na osvetľovanie, musíme brať do úvahy technické predpisy a normy. Technická norma ČSN EN 12464-1 je preložená z normy EN 12464-1:2002. Pojednáva o správne osvetlenom pracovisku, ktoré sa nachádza vnútri z hľadiska kvality a kvantity. Sú v nej uvedené hodnoty, ktoré majú zabezpečiť dobrý zrakový výkon a minimalizovať namáhanie očí. Sú v nej pre príklad uvedené požiadavky na odraz jednotlivých povrchov v miestnostiach. Pre strop je uvedený rozsah 0,7 až 0,9 pre steny 0,5 až 0,8 a pre podlahy 0,2 až 0,4. Tým sa vylučuje použitie tmavých povrchov. Norma tiež požaduje udržiavané osvetlenie 30 lx pre strop a 50 lx pre steny a mnoho ďalších parametrov. Hlavnými kritériami pre splnenie kvantitatívnych a kvalitatívnych požiadaviek je zraková pohoda a výkon kedy sú pracovníci schopní vykonávať zrkové úlohy i v ťažších podmienkach dlhú dobu a bezpečnosť. Parametre, ktoré určujú svetelné prostredie sú: rozloženie jas, osvetlenosť, smerovosť svetla, oslnenie, farebný tón svetla, miešanie svetla, denné svetlo. Osvetlenosť a jej rozloženie v mieste zrkového úkonu a v jeho blízkom okolí má výrazný vplyv na rýchlosť a bezpečnosť vykonávania zrkovej úlohy. Odporučená rada osvetlenosti je: 20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1 000 – 1 500 – 2 000 – 3 000 – 5 000. Najnižšia rada osvetlenia je 20 lx, čo zodpovedá rozlíšeniu obrysov ľudskej tváre. Osvetlenosť má byť zvýšená keď: je zraková činnosť pri práci rozhodujúca, sa chyby nákladne opravujú, je presnosť a vysoká produktivita veľmi dôležitá, sú zrkové schopnosti pracovníkov znížené, sú zrkové úlohy neobvykle malé a nedostatočne kontrastné, úloha je vykonávaná neobvykle dlho. V priestoroch s trvalým pobytom osôb nesmie byť osvetlenie nižšie ako 200 lx. Osvetlenie okolia úlohy je potrebné kvôli vyváženiu jas v zornom poli. Nevyváženie by mohlo spôsobiť zrkové namáhanie a nepohodu. Oslnenie je spôsobené vysokým jasom alebo odrazom svetla. Farebný tón je od 3300 do 5300 K neutrálne biely. Pri nižších hodnotách ho nazývame

teplý a pri vyšších chladný. Voľba farebného tónu je záležitosťou psychológie. V teplých oblastiach sa odporúča chladný tón a v chladných zasa teplý tón farby svetla. Norma uvádza zoznam priestorov a úloh pre ktoré sú uvedené hodnoty udržiavanej osvetlenosti, oslnenia a minimálneho indexu farieb. Napríklad pre predajné priestory je to 300 lx pre udržiavanú osvetlenosť, 22 pre oslnenie a 80 je minimálny index farieb. [21]

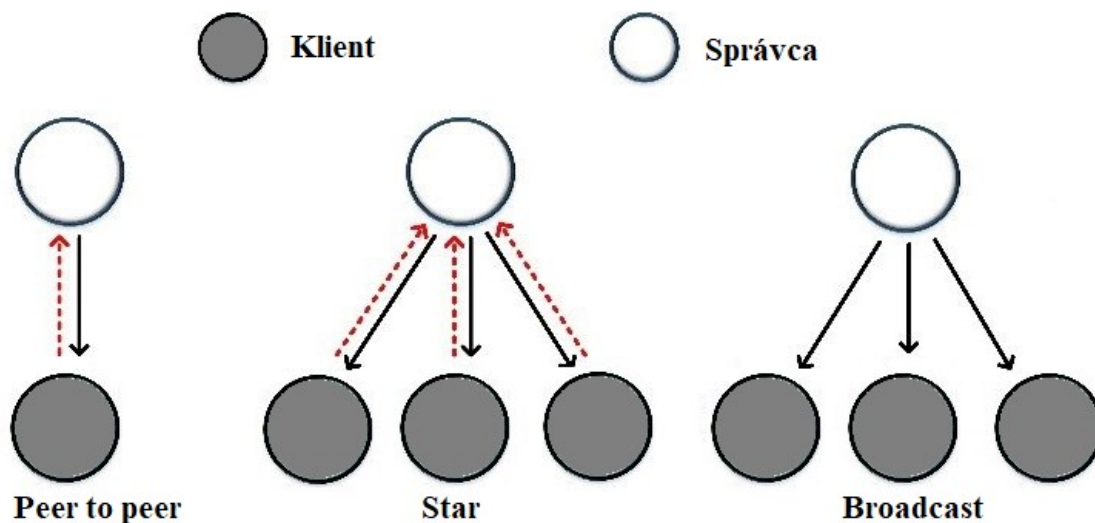
Táto norma je odporúčením pre vnútorné priestory. Preto nie je vyslovene nutné ju dodržať pri projektovaní. Keďže je to norma o osvetlení pracoviska vo vnútorných priestoroch, neplatí pre svetlo mimo nich.

4.2.4 Činitele ovplyvňujúce svetlo vo vnútornom prostredí

Oproti vonkajšiemu prostrediu sú vplyvy atmosféry na veľmi nízkej úrovni. Nevyskytuje sa tu dážď, sneh a ďalšie atmosférické vplyvy. Nevýhodou sú nežiadúce odrazy a prekážky, ktoré zamedzujú šírenie svetla, viaccestné šírenie a nízka intenzita svetla v rohoch miestností. Taktiež je nepriaznivým činiteľom parazitné svetlo rôznych zdrojov žiarenia.

4.2.5 IEEE 802.15.7: VLC

Norma IEEE 802.15.7. bola vydaná v roku 2011. Táto norma definuje technológiu VLC. Definuje samotný pojem, fyzickú PHY a spojovú MAC vrstvu pre sieť VPAN, ktorá využíva komunikáciu pomocou VLC. VLC je skratkou z Visible Light Communication, čo je v preklade viditeľná svetelná komunikácia. Zdrojom pre svetlo i dátovú komunikáciu sú LED, prípadne LD generujúce svetlo, ktorého vlnová dĺžka zodpovedá oblasti viditeľného elektromagnetického žiarenia od 380 nm do 780 nm. Táto technológia spája dve funkcie. Funkciu osvetľovania a funkciu prenosu dát. Zmeny svetelných impulzov sú také rýchle, že ich ľudské oko nepostrehne. V norme by sme mohli nájsť niekoľko podobností so staršou IR technológiou, majú napríklad rovnakú topológiu. Hlavným rozdielom však je iná vlnová dĺžka viditeľného svetla ktorá okrem iného umožňuje aj použitie vyšších výkonov pre vyžarovanie svetla. VLC technológia je pomerne nová a stále nebol využitý jej celkový potenciál takže sa stále rozvíja. VPAN poskytuje dátovú komunikáciu v rámci PAN, čo značí pokrytie oblasti rádovo niekoľkých metrov, a zároveň poskytuje praktické osvetlenie tejto oblasti. Definuje poruchy spojenia spôsobené rušením a šum. Norma tiež dodržiava platné bezpečnostné predpisy týkajúce sa ochrany zraku. Normy zabezpečujú vzájomnú kompatibilitu systémov. Preto aj táto norma obsahuje predpisy, ktoré sa týkajú technológie siete, štruktúry, adresovania, predchádzania kolízií, kvality viditeľnosti, stabilizácie a indikácie kvality a intenzity výkonu, prístupu k frekvenciám v bezlicenčnom pásme, zabezpečenia komunikačného kanála fyzickým oddelením, zabezpečenia proti elektromagnetickým interferenciám a dopĺňania existujúcich služieb. IEEE 802.15.7 tiež udáva tri, už známe topológie, ktoré sa používajú pre VLC siete vid' obr. 4.6.[22][23]



Obrázok 4.6: Topológie používané vo VPAN [23]

V rámci fyzickej vrstvy PHY definuje tri vrstvy s rôznymi prenosovými rýchlosťami.

PHY 1 sa používa vonku a pre VLC, ktoré nevyžadujú vysoké prenosové rýchlosti. Rádovo sú to desiatky až stovky kbit/s (11,67 kbit/s - 266,6 kbit/s). Používa sa tu on-off kľúčovanie (OOK) a variabilná pulzne polohová modulácia (VPPM). [23]

PHY 2 tiež využíva OOK a VPPM. Prenosové rýchlosti dosahujú desiatky Mbit/s (1,25 Mbit/s - 96 Mbit/s). [23]

PHY 3 zahŕňa zdroje svetla s rôznymi typmi modulácie. Napríklad CSK (color shift keying) Prenosové rýchlosti rôznych modulácií dosahujú rádovo desiatky Mbit/s (12 Mbit/s - 96 Mbit/s). [23]

5 Optické prvky používané požívané v optických sieťach

V predchádzajúcich kapitolách už je popísané správanie svetla vo vzťahu k optickým vláknam. Pre ucelenejší a istejší prehľad budú v tejto kapitole popísané ďalšie základné optické prvky, ktoré sa používajú pri prenose svetla.

5.1 Zdroje žiarenia

Svetlo je energia, ktorá vzniká za určitých podmienok. Ako zdroje svetla, resp. vysielачe sa využíva elektrická energia, ktorá podnecuje vyžiarovanie fotónov. Poznáme dve základné rozdelenia zdrojov svetla pre optické vysielачe podľa technológie konštrukcie, LED a laser.

5.1.1 LED

LED je skratkou pre elektroluminiscenčnú diódu z anglického Light Emitting Diode. Ide o polovodičovú súčiastku, ktorá emituje svetlo po priechode elektrického prúdu. Svetlo vzniká v PN prechode pri vzájomnom priblížení a rekombinácii párov elektrón a diera kedy sa uvoľní určité kvantum energie, ktoré vyžiari z kryštálu vo forme fotónov. Prvé diódy sa v praxi objavili v roku 1962, odkedy sa zmenili materiály a zlepšili sa ich parametre. Existujú LED diódy, ktoré vyžarujú svetlo ultrafialové, viditeľné i infračervené, pričom spektrum svetla má rádovo jednotky až desiatky nanometrov. Jedná sa o nekoherentné svetlo. Biele svetlo je možné vytvoriť kombináciami LED diód alebo LED s luminoforom vid' kap. 4.2.2.[24]

5.1.2 Laser

LASER je skratkou z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, čo znamená zosilnenie svetla stimulovanou emisiou. Vzniknuté svetlo je na rozdiel od LED koherentné, čo znamená, že vyžiarené fotóny majú rovnaké vlastnosti, ako napríklad vlnová dĺžka, smer, fáza a polarizácia. Pre vznik takéhoto žiarenia je potrebná inverzná populácia a viac-hladinový systém atómov. Ďalšou potrebnou súčasťou je rezonátor tvorený sčasti priepustnými zrkadlami, medzi ktorými lavínovou reakciou narastá počet fotónov vďaka odrazom. Oproti LED sú nevýhodou rozmery, energetická účinnosť a vyžarovanie tepla. Výhodou však je koherentné svetlo, ktoré môže mať šírku pásma rádovo v pm.[1][16]

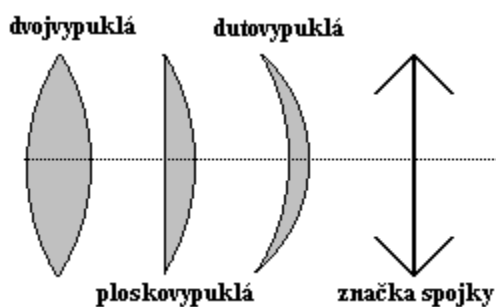
5.2 Šošovky

Šošovky sú z opticky čistého materiálu s indexom lomu väčším ako 1. Materiálom je sklo alebo plast, ktorý je ohraničený z jednej strany guľovou plochou a z druhej rovinou alebo tiež guľovou. Podľa tvaru a ich pôsobenia na lúč ich ďalej rozdeľujeme na spojky a rozptylky. Existujú však aj ďalšie, špeciálne typy, ako sú toroidná, asférická, multifokálna, valcová alebo cylindrická. Pôsobenie šošoviek na svetlo, ktoré nimi prechádza popisuje geometrická optika. Lúče svetla sa lámu pomocou Snellovho zákona lomu.[25]

5.2.1 Spojky

Spojné šošovky spôsobujú zbiehavosť optických lúčov do bodu, ktorý nazývame ohnisko. Sú vždy hrubšie v strede a tenšie na okrajoch. Jedna strana tejto šošovky je vždy guľového tvaru, ktorý je vypuklý smerom od stredu vid' obr. 5.1. Podľa tvaru druhej strany takejto šošovky, môžeme spojky ďalej rozdeliť na:

- dvojvypuklé – aj druhý povrch je vypuklý[26]
- ploskovypuklé – druhý povrch je rovinný[26]
- dutovypuklé – druhý povrch je dutý[26]

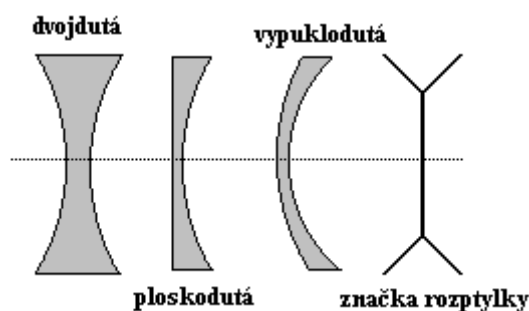


Obrázok 5.2: Spojky[26]

5.2.2 Rozptylky

Rozptylné šošovky, rozptylky sú v podstate opakom spojok. Spôsobujú rozbiehavosť optických lúčov a sú v strede užšie ako na okrajoch. Jedna strana rozptylky je vždy guľového tvaru, ktorý je dutý smerom ku stredu vid' obr. 5.2. Podľa tvaru druhej strany takejto šošovky môžeme rozptylky rozdeliť na:

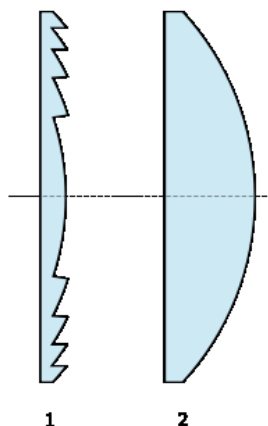
- dvojduté (bikonkávne) – aj druhý povrch je dutý[26]
- ploskoduté (plankonkávne) – druhý povrch je rovinný[26]
- vypukloduté (konvexkonkávne) – druhý povrch je vypuklý.[26]



Obrázok 5.2: Rozptylky[26]

5.2.3 Fresnelove šošovky

Fresnelova šošovka je špeciálny typ, ktorý dokáže nahradiť šošovky veľkých rozmerov a vysokých hmotností. Na obr. 5.3. môžeme vidieť ekvivalentné prevedenie šošoviek s rovnakými vlastnosťami. Táto šošovka využíva toho, že výplň šošovky je vlastne nepodstatná, keďže sa svetlo láme na rozhraní materiálov, teda na jej povrchu.[26]



Obrázok 5.3: 1- Fresnelova šošovka 2 - bežná šošovka [26]

5.3 Difúzor

Svetlo vystupujúce so zdroja nesmeruje tak ako vyžaduje potreba alebo účel. Pre úpravu smerovania intenzity svetla slúži difúzor. Vďaka difúzoru môžeme napríklad laser z triedy 3 zaradiť do triedy 1 vďaka rozptýleniu výkonu svetla. Difúzorom môžeme nielen korigovať rozloženie optického výkonu, ale aj minimalizovať viaccestné šírenie.

5.4 Filtre

Prijímače pracujú s určitým spektrom svetla. Kvôli účinnosti prijatého svetla je potrebné odfiltrovať nežiadúce zložky dopadajúce na detektor. Podobne ako pri filtrovaní rádiových frekvencií, existujú filtre typu horná priepusť, dolná priepusť a pásmová priepusť, ktoré prepúšťajú určité spektrum a zbytok neprepúšťajú, teda filtrujú. Existujú filtre s priepustnosťou napríklad iba 1 nm. Pásmovú priepusť je možné vytvoriť aj kombináciou hornej priepusti a kremíkového fotodetektoru. Optické filtre môžu pôsobiť nielen na vlnovú dĺžku, ale aj na uhol dopadu svetla.

5.5 Koncentrátory

Jednou z možností na zvýšenie efektivity prijímača je zväčšenie prijímacej plochy. Zväčšením zbernej plochy fotodetektoru však zvýšime aj prijímanie parazitného svetla. Šum, ktorý spôsobuje parazitné svetlo je eliminovaný koncentrátorom, ktorý zároveň spolu s filtrom dokáže zvýšiť efektívnosť zachytávania optických lúčov. Koncentrátor teda transformuje zväzok lúčov dopadajúci na veľkú plochu na zväzok vychádzajúci z menšej plochy. Koncentrátor vďaka zvýšeniu efektívnej zbernej plochy bez zvýšenia aktívnej zbernej plochy, zabezpečí väčšiu účinnosť prijímača a použitie menších a lacnejších fotodetektorov. Optické koncentrátory môžeme rozdeliť na zobrazovacie a nezobrazovacie.[16]

5.5.1 Zobrazovacie koncentrátory

Zobrazovacie sa požívajú vo vonkajších FSO kde je priama viditeľnosť bod-bod. Nie je teda potrebná mobilita a široké zorné pole prijímača.

5.5.1.1 Fresnelova šošovka

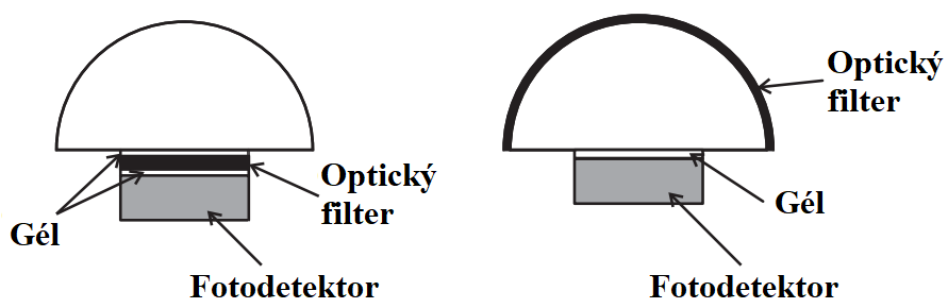
Táto šošovka minimalizuje vady šošoviek a posúva stred krivosti každého kruhu pozdĺž osi. Využíva sa tu prevládajúci vplyv lomu na povrchu čím sa šetrí materiál a hmotnosť vid' kap 5.2.3.

5.5.2 Nezobrazovacie koncentrátory

Nezobrazovacie sa požívajú vo vnútorných FSO, kde je potrebný väčší zorný uhol kvôli mobilite v OW. Patria sem hemisférické a parabolické koncentrátory. [16]

5.5.2.1 Hemisférické koncentrátory

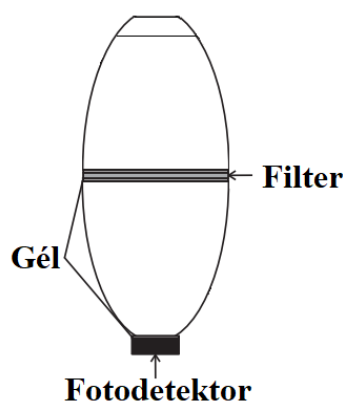
Skladajú sa z hemisférickej šošovky a optického filtra, ktorý je umiestnený na povrchu šošovky alebo na povrchu fotodetektoru. Jeho výhodami sú jednoduchosť, nízka cena a teoreticky široký zorný uhol. Nevýhodou je náročnosť výroby vhodného tenkého optického filtra. Na zamedzenie nechcených odrazov sa používa optický gél vid' obr. 5.4. [16]



Obrázok 5.4: Hemisférický koncentrátor [16]

5.5.2.2 Parabolické koncentrátory

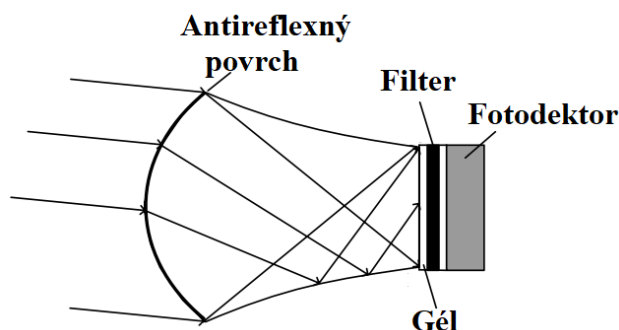
Alternatívou ku hemisférickému koncentrátoru je koncentrátor parabolický. Je zložený z dvoch parabol vid' obr. 5.5 a má väčší zisk ako hemisférický koncentrátor. Jeho zorné uhly môžu byť od 0 do 90°. Ďalšou výhodou je použitie plochých tenkovrstvových filtrov. [16]



Obrázok 5.5: Parabolický koncentrátor [16]

5.5.2.3 Dielektrický koncentrátor

Nazývané aj DTIRC koncentrátor pracujú na princípe úplného vnútorného odrazu DTIRC. Využívajú vlastnosti dielektrických materiálov a skladajú sa z troch častí: zakrivený čelný povrch, odrazný profil a výstupný otvor vid' obr. 5.6. Na fotodetektor dopadnú iba lúče, ktoré dopadajú na čelnú plochu pod uhlom menším ako je kritický uhol. Vlastnosti koncentrátoru závisia na geometrických tvaroch a indexe lomu materiálu. Podľa uhlu zakrivenia vstupného oblúku a indexu lomu platí, že čím je uhol väčší, tým je menšie zosilnenie koncentrátoru. Čím je väčší index lomu, tým je aj zosilnenie väčšie. Maximálny uhlový príjem je ovplyvnený aj silnou závislosťou optického filtra na uhle dopadu. Tento vplyv vstupného oblúku podnietil vznik parabolických a eliptických DTIRC koncentrátorov. [16]



Obrázok 5.6: DTIRC koncentrátor [16]

5.6 Kolimátory

Kolimátory slúžia na korigovanie lúčov do rovnobežného smeru. Usmerňujú teda lúče z rôznych smerov do jedného. Sú zložené so sústavy šošoviek alebo zrkadiel. Používajú sa predovšetkým s laserovými diódami. Existuje mnoho druhov kolimátorov, ktoré majú rôznu citlivosť a schopnosť priestorového rozlíšenia. Delia sa podľa tvaru a počtu otvorov a podľa energie svetla, s ktorou pracujú.[22]

6 Vysielače vo vnútorných bezvláknových optických sieťach

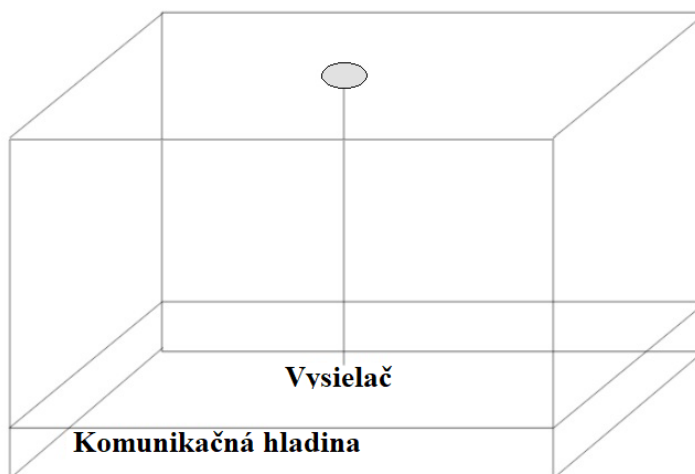
Ako bolo vysvetlené v kapitole 4.2.1, Optické systémy vysielania vo vnútorných bezvláknových optických sieťach môžeme rozdeliť do dvoch hlavných skupín podľa viditeľnosti. Systémy s priamou viditeľnosťou a systémy s nepriamou viditeľnosťou medzi vysielačom a prijímačom. Oba tieto systémy je možné za určitých podmienok zároveň použiť na funkciu osvetľovania. Vývoj týchto systémov je však zatiaľ v začiatkoch.

6.1 Optické vysielače vnútorných bezvláknových sietí s nepriamou viditeľnosťou

Tento systém OW siete sa tiež nazýva difúzny kvôli využitiu difúzora. Difúzory znižujú hustotu optického žiarenia vysielača a korigujú rozptyl na úroveň, ktorá neohrozuje ľudské zdravie. Môžu mať účinnosť až 70 %

6.1.1 Konvenčný difúzny systém

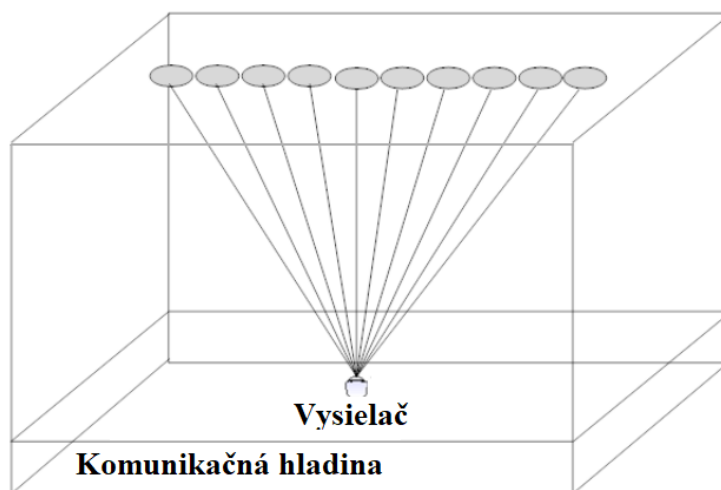
Skratkou CDS z anglického Conventional-Diffuse-System je najjednoduchší koncept difúznej siete. Pozostáva z jedného vysielača umiestneného na podlahe a prijímača s vysokým prijímacím uhlom, dosahujúcim až 180°. Pokrytie miestnosti je vykonávané odrazom svetla od stropu do všetkých strán. Z tohto systému však vyplýva aj jeho nevýhoda. Je ňou nerovnomerné pokrytie miestnosti, najmä jej rohov, kde je výkon niekoľkokrát nižší ako v centre miestnosti. Tento koncept môžeme vidieť na obr.6.1.[4]



Obrázok 6.1: Konvenčný difúzny systém[4]

6.1.2 Jednopásový viaczväzkový vysielač

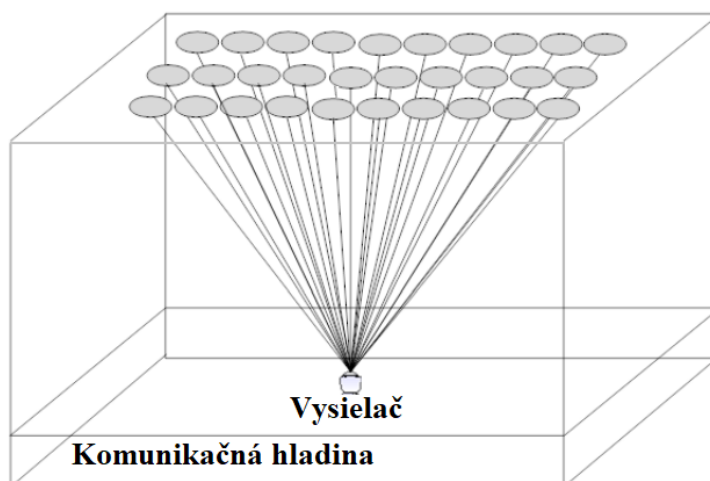
Skratkou LSMS z anglického Line-Strip-Multibeam-Transmitter využíva objemový holografický difúzor, ktorý dokáže meniť amplitúdu i fázu. S. T. Jivkova a M. Kavehrad navrhli difúzor tak, aby vysielané optické zväzky tvorili na stope miestnosti s rozmermi $6 \times 6 \times 3$ m pás tvorený svetelnými stopami, ktoré sú od seba rovnako vzdialené a ich intenzita je rovnaká. So zvyšujúcim sa počtom úrovní stôp sa zvyšuje aj difrakčná účinnosť. Tento koncept môžeme vidieť na obr. 6.2.[4]



Obrázok 6.2: Jednopásový viaczväzkový vysielač[4]

6.1.3 Viacpásový viaczväzkový vysielač

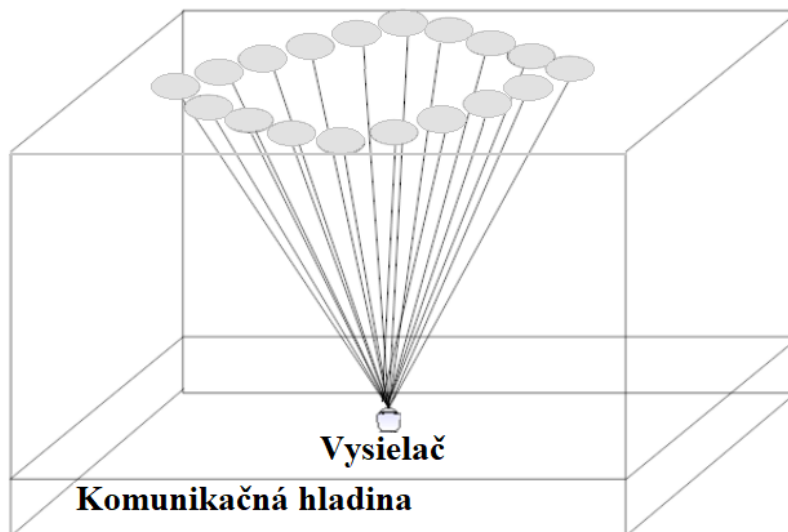
Tento typ, pri návrhu G. Yuna a M. Kavehrada využíva ako zdroj žiarenia úzkopásmové žiarenie laseru s výkonom 2dBm a vlnovou dĺžkou 780 nm. Žiarenie je namierené na strop, kde vytvára stopy s pravidelnými rozstupmi a rovnakou optickou intenzitou vid' obr. 5.3. Pre odfiltrovanie viditeľného svetla, bol použitý elektrický Butterwordov filter s frekvenciou 2 kHz.[4]



Obrázok 6.3: Viacpásový viaczväzkový vysielač[4]

6.1.4 Diamantový viacvážkový vysielač

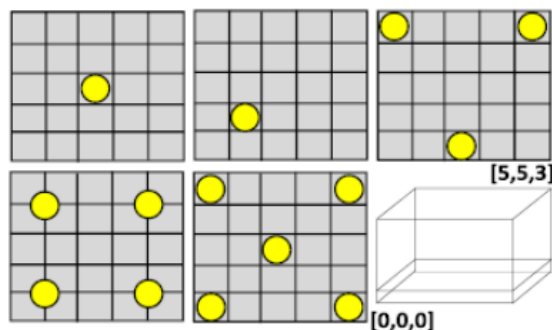
Tento typ vysielača má odvodený názov od spôsobu usporiadania optických stôp na strope vid' obr. 5.4. Vedci A. G. Al-Ghamdi a J. M. H. Elmigahani navrhli tento koncept tvorený štyrmi pásmi zloženými z 20 svetelných stôp s rozstupmi 10 cm. Prijímače boli umiestnené v rôznych výškach, nízka intenzita v rohoch miestnosti však stále nebola vyriešená.[4]



Obrázok 6.4: Diamantový viacvážkový vysielač[4]

6.2 Vysielače OW s priamou viditeľnosťou

Pri vysielačoch s priamou viditeľnosťou nastáva nevýhoda oproti systémom s nepriamou viditeľnosťou v možnosti vysokej mobility v rámci miestnosti. Výhodou však je omnoho vyššia výkonová efektívnosť medzi vysielačom a prijímačom, teda vyššia úroveň výkonu optického signálu na prijímači vzhľadom na vysielačový výkon. Mobilita a nerovnomernosť rozloženia intenzity v prípade tohto konceptu môže byť podporená väčším počtom vysielačov. Takýto návrh testoval G. N. Bakalidis so spolupracovníkmi, ktorí testovali vysielače umiestnené na strope v miestnosti s rozmermi 5 x 5 x 3 m v počte 1, 2, 3, 4 a 5 vid' obr. 5.5. Najrovnomernejšie rozloženie intenzity bolo dosiahnuté v prípade použitia 4 vysielačov s výkonom 1W. Tento prípad však nesplnil úlohu optického komunikačného vysielača aj osvetľovania zároveň. [27]



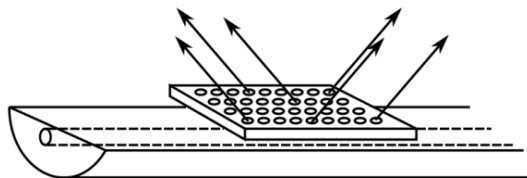
Obrázok 6.5: Umiestnenie vysielačov na strope[27]

6.3 Optické vlákno ako vysielač

Použitie optického vlákna ako vysielača umožňuje oddeliť miesto vzniku optického žiarenia od miesta vyžarovania, čo môže byť využité v priestoroch kde nesmie byť prítomná elektrická energia z bezpečnostných dôvodov, je potrebné eliminovať zdroj tepla alebo z iných dôvodov, ktoré vyžadujú oddelenie zdroja svetla a miesta vyžarovania svetla.

6.3.1 Vyviazanie svetla pozdĺž vlákna

Tento typ vláknového vysielača vysiela svetlo pozdĺž zrezaného plášťa do tvaru písmena D. Pri prvých pokusoch bolo použité vláknom, ktorého jadro bolo z oxidu kremičitého, ktorý bol kvôli optimalizácii lomu dopovaný oxidom germančitým. Takéto vlákno malo brúsený a leštený plášť. Optický výkon prenášaný jadrom bol vyviazaný na mieste s materiálom, ktorý má vyšší index lomu do vysielačieho elementu, ktorý sa skladá z mikrošošoviek. Vyviazanie svetla z takéhoto vlákna môžeme vidieť na obr. 6.6.[28]



Obrázok 6.6: Vyviazanie svetla z vlákna s D-profilom[29]

6.3.2 Vyviazanie svetla na konci vlákna

Vláknový vysielač, ktorý používa vyviazanie svetla na konci vlákna môže zahŕňať aj ďalšie optické prvky ako sú šošovky, koncentrátory alebo zrkadlá. Taktiež závisí na materiáli a tvare ukončenia optického vlákna. Existujú experimenty, ktoré využívajú pohyblivé zrkadlo na smerovanie optického zväzku. V jednom prípade je vysielač umiestnený na strope a v druhom na zemi. Vysielanie teda prebieha v zostupnom alebo vzostupnom smere. Pohyblivé zrkadlo a adaptívna optika, ktoré slúžili na smerovanie lúča na mobilný bod boli ovládané pomocou rádiových vln. V týchto experimentoch sa autori dostali na rýchlosť 12.5 Gbps pri použití vlnového multiplexu s rozstupom medzi kanálmi 100 MHz a použitou moduláciou OOK.[4]

6.3.3 Vplyv zakončenia optických vlákien

V kapitole 3.1 je popísaná schopnosť vlákna prijať svetlo do vlákna a ďalej ho šíriť. Tento parameter, ktorý nazývame numerická apertúra súvisí rovnako aj s vyviazaním svetla z vlákna. Závisí na pomere indexu lomu jadra a plášťa vid' vzorec (3.3). Okrem indexu lomu materiálu má vplyv aj geometrický tvar zakončenia vlákna. Vplyv zakončenia optických vlákien môžeme porovnať s vplyvom šošoviek na lúče svetla pri prechode nimi, pričom klasické šošovky nedosahujú také malé rozmery ako sú priemery optických vlákien a nie sú súčasťou rovnakého materiálu. Zakončenia vlákien môžu byť vytvorené technologickými úpravami samotného vlákna alebo prilepením tohto zakončenia vytvoreného zvyčajne z PDMS.

6.3.3.1 Zúženie konca vlákna

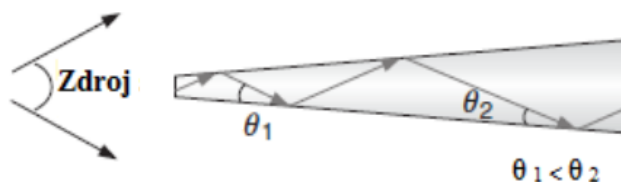
Pri zužovaní konca vlákna sa výstupná hodnota NA sa zvyšuje vid' obr. 6.7. Vime, že NA je definovaná ako sínus maximálneho uhlu, pri ktorom sa budú ešte svetelné lúče šíriť v prostredí ďalej vid' kap. 3.1, vzorec 3.3. Zvyšovanie výstupnej NA teda nastáva kvôli zvyšovaniu numerickej apertúry pri lome lúčov v zošikmenej časti vlákna.



Obrázok 6.7: Zúžený koniec vlákna[22]

6.3.3.2 Rozšírenie konca vlákna

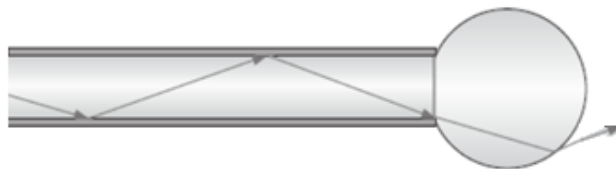
Pri rozšírení konca vlákna, uhol stúpa a NA sa znižuje vid' obr. 6.8 . Jedná sa o opačný princíp ako pri zúžení konca vlákna. Svetelné lúče pri ceste kužeľom zväčšujú svoje odrazové uhly.



Obrázok 6.8: Rozšírený koniec vlákna[22]

6.3.3.3 Zakončenie tvarom polgule

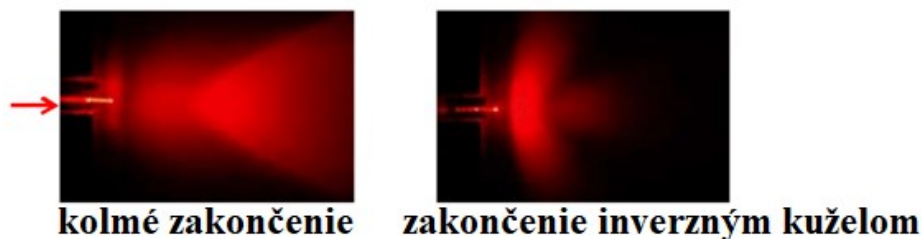
Guľová plocha na konci vlákna môže slúžiť ako difúzor, ktorý by nebol príliš stratový vďaka použitiu opticky čistého materiálu.



Obrázok 6.9: Guľa na konci vlákna[22]

6.3.3.4 Inverzný kužeľ

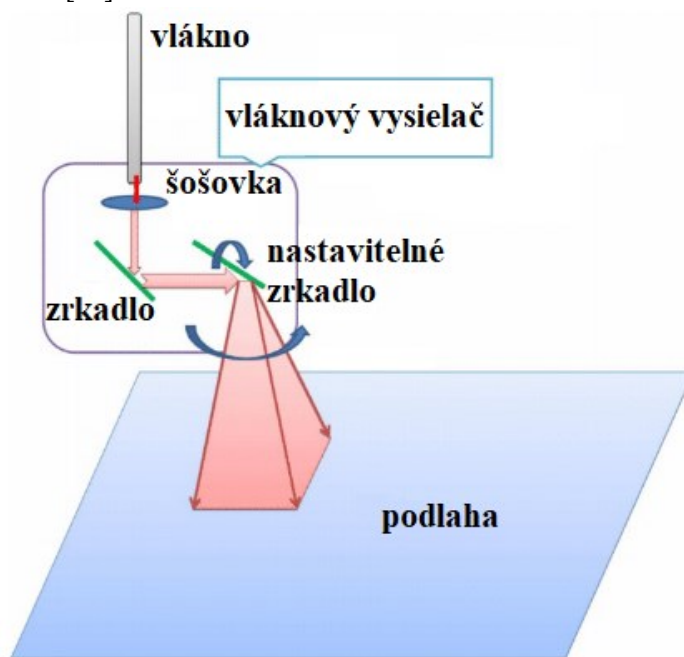
Zakončenie typu inverzný kužeľ je vytvorené priehlbínou na konci vlákna v tvare kužeľa. Takéto zakončenie je technologicky náročné najmä čo sa týka hladkosti povrchu. Na obrázku 6.10 vidíme vplyv tohto zakončenia na rozloženie optického výkonu. Takéto zakončenie sa javí nevhodné kvôli tomu, že tento tvar vlastne eliminuje dopredné vyžarovanie. Vhodné by na teoreticky mohlo byť jedine na krátke vzdialenosti alebo na rozloženie vysokých výkonov, ktoré so sebou prinášajú nevýhody týkajúce sa ohrozenia zdravia.[30]



Obrázok 6.10: Inverzný kužel' na konci vlákna[30]

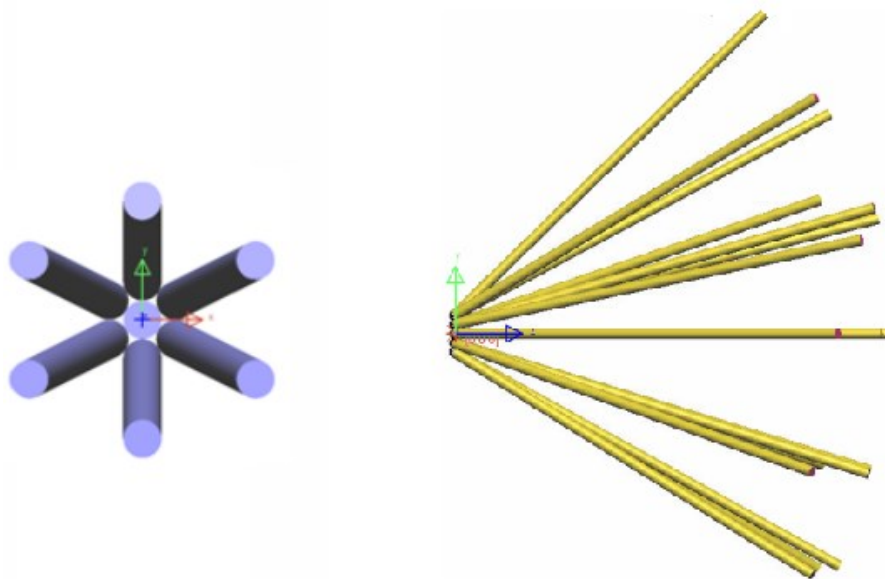
6.4 Testované konfigurácie vysielačov vo vnútorných bezvláknových optických sieťach

Tímy výskumníkov okolo Ke Wanga po prvý krát uskutočnili prenos rýchlosti 1 Gb/s pri použití OOK kľúčovania pomocou rozptýleného lúča v miestnosti 10x8x3m. Interferencie, ktoré nastali kvôli odrazu od stien, podlahy a nábytku, boli tak malé, že ich možno zanedbať. Kombinovali OW a RF systémy. RF systém bol použitý na lokalizáciu zariadenia. Vďaka zisteniu polohy zariadenia cez WiFi bola manipulovaná adaptívna optika. Výkon bol limitovaný na 7mW svetelného výkonu kvôli bezpečnosti očí a kože, pričom vysielač mohol pokryť šírku 2 metre. Systém však má potenciál dosahovať vyššie rýchlosti.[31] V ďalšom experimente dosiahli 12,5 Gb/s s mobilitou po celej miestnosti a $BER < 10^{-9}$. Vysielač pozostáva z optického vlákna, šošovky a polohovateľného zrkadla vid' obr. 6.11. Vlnová dĺžka svetla bola 1550.12 nm produkovaná DFB laserom. BER sa menilo v závislosti od polohy prijímača. Najlepšie hodnoty boli v centre vysielača. Pre 10 Gb/s to bolo $10^{-6,7}$. Svetelná stopa mala 0,84 m.[32] Ďalším pokusom bol prenos dát po viacerých kanáloch. Použitím technológie WDM bolo modulovaných prenášaných 4x12.5 Gb/s. Lokalizácia prebiehala cez WiFi. Veľkosť buniek pre lokalizáciu predstavovala 75x75 cm.[33]



Obrázok 6.11: Optický vysielač Wangovho tímu[32]

V mojej práci sa odrážam najviac od práce Dr. Jána Látala, ktorá sa zaoberá štúdiou vplyvu zakončenia optických vlákien na distribúciu svetla v priestore pre vláknové segmentové vysielače bez použitia adaptívnej optiky. V jeho práci bolo použité mnohovidové optické vlákno od firmy Nufern s priemerom $105\text{ }\mu\text{m}$ a typovým označením S105/125-22A a LED dióda s vlnovou dĺžkou 525 nm . Počet vlákien bol zvolený na 7 a 19, a boli usporiadané do kruhu. Jedno vlákno uprostred je stabilným bodom, od ktorého sa vlákna dookola v kruhu odkláňajú v rôznych uhloch natočenia viď obr. 6.12. Zakončenia optických vlákien boli kolmé alebo tvorené polgulťou z PDMS. Daná práca predpokladá ďalší možný vývoj s inými typmi vlákien.[4]

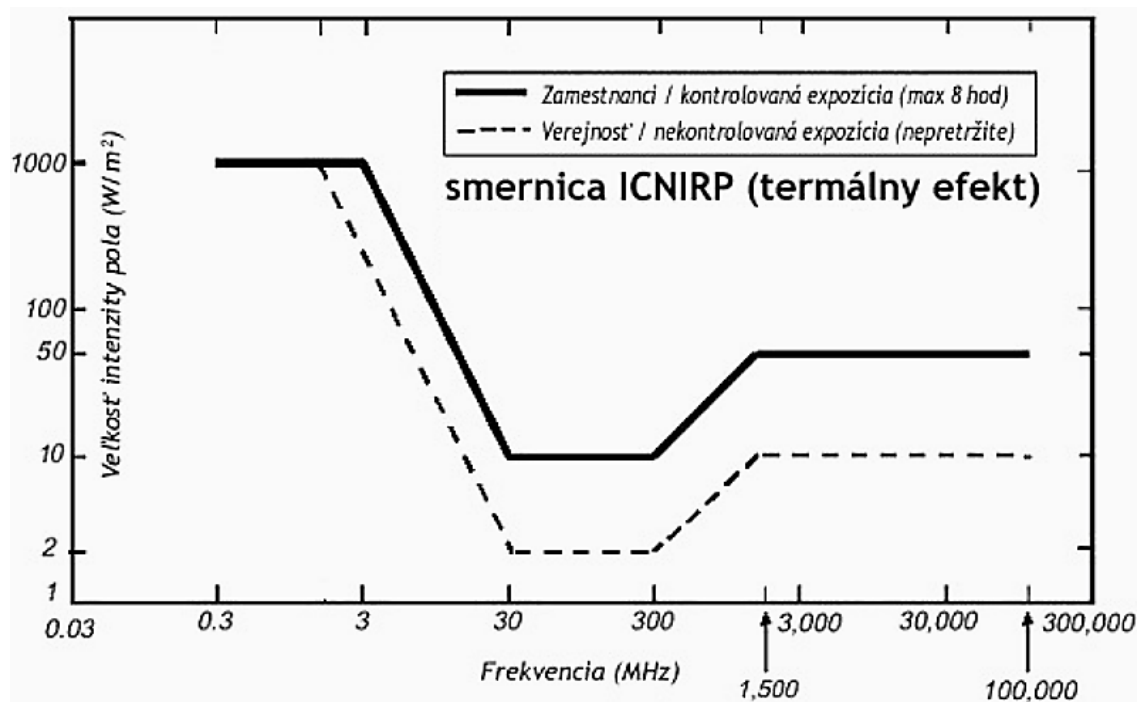


Obrázok 6.12: Zobrazenie usporiadania vlákien- vľavo 7, vpravo 19[4]

Multimódové vlákna s širším priemerom jadra a plášťa umožňujú jednoduchšie naviazanie svetla do vlákna a taktiež prinášajú širšie vyžarovacie uhly, čo je zapríčinené zvýšenou numerickou apertúrou. Ďalšou výhodou je jednoduchšia manipulácia a väčšia mechanická odolnosť širších vlákien. Nevýhodou však je väčší útlum vlákna pre konvečné, ale i nekonvenčné vlnové dĺžky. Nevýhoda disperzie u multimódových vlákien nie sú podstatné pri optických vláknových vysielačoch v prípade použitia krátkych dĺžok optických vlákien. Preto vo svojej práci použijem doposiaľ netestované multimódové vlákno od firmy OFS Fitel, LLC., so skokovou zmenou indexu a označením HCG-M0550T. Priemer jadra vlákna je $550\text{ }\mu\text{m}$ a priemer plášťa $600\text{ }\mu\text{m}$. Celkový priemer vlákna, aj s ochrannými obalmi je $750\text{ }\mu\text{m}$. Útlm vlákna je pre vlnovú dĺžku 820 nm definovaný na $\leq 10\text{ dB/km}$. Vysoký obsah OH ho predurčuje na použitie v oblasti ultrafialového a viditeľného svetla. Numerická apertúra vlákna je 0,22. Tieto vlastnosti ho zaraďujú medzi špeciálne typy vlákien, alebo nekonvenčné multimódové optické vlákna.[34]

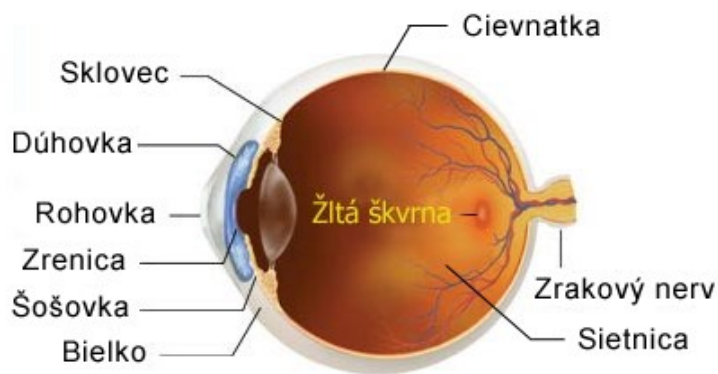
7 Bezpečnosť žiarenia

Dôležitým, no často opomínaným faktorom pri bezdrôtových elektromagnetických komunikáciách, je vplyv na zdravie. V súčasnosti už existujú štúdie, ktoré dokazujú, že elektromagnetické žiarenie vysielané z mobilných telefónov, Wi-Fi, televíznych a rozhlasových vysielačov, vysielačov mobilnej siete, mikrovlnných rúr a teda zariadení, ktoré môžeme súhrnne pomenovať ako zariadenia využívajúce elektromagnetické rádiové frekvenčné žiarenie - RFR predstavujú nebezpečenstvo pre zdravie ľudí, zvieratá aj rastliny. Je síce pravda, že živočíchy na zemi sú od počiatku vystavené vplyvom elektromagnetického žiarenia, ktorým sa dokázali adaptovať, je to však neporovnateľné voči dnešnej miere masového používania RFR. Účinky RFR sú klasifikované na tepelné a netepelné. Limitné normy expozície RFR sú založené hlavne na tepelných účinkoch, netepelné účinky RFR, ktoré sú na úrovni bunkových štruktúr a procesov sú však omnoho nebezpečnejšie. Dokazuje to aj smernica vydaná v roku 1998 ICNIRP (International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection), ktorá slúži len ku ochrane verejnosti pred krátkodobými termálnymi účinkami. Táto smernica je záväzná pre všetky členské štáty Európskej únie. Graf limitov môžeme vidieť na obrázku 7.1. Už v roku 2000 však bol na konferencii v Salzburgu prijatý preventívny limit $0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ čo je 10 000-krát prísnejší limit ako v smernici ICNIRP. Najčastejšími dôsledkami expozície RFR sú: poruchy spánku, závraty, bolesť hlavy, palpitácie srdca, porucha koncentrácie, poruchy zraku, porucha, pamäte, kardiovaskulárne problémy, depresie, únava, pozmenené reflexy, zvýšené riziko rakoviny oka, ucha a ďalších druhov rakoviny. Mnohé z týchto problémov sú spojené so zmenami elektrickej aktivity mozgu kvôli stresovej reakcii buniek, produkujúcich tzv. heat-shock proteín. Najzraniteľnejšie sú samozrejme deti. U dospelého jedinca preniká do lebky iba 25 % RFR, u 10 ročného dieťaťa je to 50 % a u 5 ročného 75%. Najviac je ohrozený ľudský plod. Na genetotoxickej úrovni môže dôjsť k neurodegeneratívnym chorobám, poškodeniu DNA, Alzheimerovej chorobe, Parkinsonovej chorobe, zvýšeniu rizika rakoviny, poškodeniu sluchu a degradácii imunitného systému. [35]



Obrázok 7.1: Smernica ICNIRP[35]

Mali by sme byť na pozore pred neprirodzenými druhmi elektromagnetických polí v prírode. Elektromagnetické žiarenie je dobrý sluha ale zlý pán. Z predchádzajúcich informácií môžeme usúdiť, že presun bezdrôtovej komunikácie z oblasti rádiových vln do oblasti svetelných elektromagnetických vln má pravdepodobne aj výhodu týkajúcu sa zdravia. Nebezpečenstvo elektromagnetického žiarenia pri frekvenciách svetla však nepominulo. Najcitlivejšie na svetelné žiarenie je ľudské oko vid' obr. 7.2. Síce dokáže detegovať iba svetlo vlnových dĺžok približne od 380 do 780 nm, vysoký vplyv na tkanivá oka má však aj infračervené a ultrafialové svetlo. Svetlo s vlnovou dĺžkou menšou ako 400 nm je okom absorbované a pri vyššej intenzite tohto žiarenia môže spôsobiť šedý zákal alebo zápal rohovky. Pri vlnovej dĺžke presahujúcej 1400 nm čo zodpovedá infračervenému svetlu je svetlo tiež absorbované a môže spôsobiť ohriatie rohovky a šošovky a tým spôsobiť ich tepelné poškodenie. Sietnicu môže poškodiť svetlo vlnovej dĺžky medzi 400 a 1400 nm. Intenzitu svetla dopadajúceho na sietnicu dokáže oko regulovať sťahovaním a rozťahovaním zrenice. Pupila môže mať pri vysokej svetelnej intenzite iba 2 mm a pri nízkej 8 mm. Pôsobenie rôznych vlnových dĺžok svetla je zoskupené v tab. 7.1. Oko je také citlivé, že za tmavej noci bez vysokej miery atmosférických turbulencií je schopné vidieť zapálenú sviečku na 27 km. Citlivosť však nie je rovnaká v celom rozsahu. Najcitlivejšie je oko na svetlo vlnovej dĺžky 550 nm. Zrakový vnem nevzniká pri dopade na sietnicu okamžite a tiež nezaniká okamžite. Doba dohasínania závisí na intenzite aj vlnovej dĺžke. Je to 1/16 až 1/50 sekundy. Tohto sa využíva v zobrazovacej technike. Video, ktoré zobrazuje 25 snímok za sekundu je okom vnímané ako kontinuálne. Využiť tohto javu môžeme aj pri prenose informácií vo viditeľnom spektre na osvetlenie priestorov.[25]



Obrázok 7.2: Ľudské oko

V prípade vyššieho výkonu svetelných zdrojov môže dôjsť okrem poranenia očí aj ku poraneniu kože. Môže dôjsť ku rôznym fotochemickým reakciám závislých na vlnovej dĺžke či dokonca ku popáleninám. Z tohto dôvodu vznikli aj v tejto oblasti bezpečnostné normy, štandardy a rozdelenie zdrojov svetla do tried podľa bezpečnosti vid' tab. 7.2. Podľa požiadaviek normy ČSN EN 60825-1 ed. 3 musí byť každé laserové zariadenie vybavené označením, ktoré udáva do ktorej triedy je zaradené. Okrem laserov sú zdrojom svetla aj LED diódy, tie však nie sú úzkosmerové ako LED. Výkon teda nie je sústredený ale rozprestretý do priestoru. Laserová dióda sa používa ako zdroj svetla pre vonkajšie prenosy a LED pre vnútorné. Všeobecne však nie je odporúčané, aby sa ľudské oko dostalo do priameho kontaktu s akýmkoľvek svetelným zdrojom určeným na komunikáciu alebo osvetľovanie. Špeciálnu pozornosť treba venovať bezpečnosti pri používaní optických pomôcok ako sú mikroskopy, teleskopy, ďalekohľady, dioptrické okuliare pretože dokážu znásobiť nebezpečenstvo poškodenia zraku koncentráciou a zosilnením. Nebezpečie môžu zvýšiť aj slnečné okuliare pod, ktorými je zrenica oka zväčšená.[36]

Vlnová dĺžka [nm]	Oko	Pokožka
180 - 315	zápal rohovky, fotochemický šedý zákal	zvýšená pigmentácia, zvýšené starnutie
315 - 780	Fotochemický šedý zákal, fotochemické a tepelné poškodenie sietnice	Stmavnutie pigmentu, fotosenzitívne reakcie, popáleniny
780 - 1400	šedý zákal, spálenie sietnice	popáleniny
1400 - 3000	skalenie rohovky, šedý zákal, spálenie rohovky	
3000 - 10000	spálenie rohovky	

Tabuľka 7.1: Škody, ktoré môže spôsobiť svetlo oku a pokožke človeka[37]

Najčastejšie prípady nehôd sú spôsobené v laboratóriách nepoužívaním správnych bezpečnostných okuliarov, neznížením výkonu pri manipulácii a odrazenými lúčmi.

7.1 Popis výkonových tried laserov

	650 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
Trieda 1	< 0,2 mW	< 0,5 mW	< 8,8 mW	< 10 mW
Trieda 2	0,2 - 1 mW	-	-	-
Trieda 3A	1 - 5 mW	0,5 - 2,5 mW	8,8 - 45 mW	10 - 60 mW
Trieda 3B	5 - 500 mW	2,5 - 500 mW	45 - 500 mW	50 - 500 mW
Trieda 4	nad 500 mW	nad 500 mW	nad 500 mW	nad 500 mW

Tabuľka 7.2: Rozdelenie tried laserov podľa výkonu a vlnovej dĺžky[16]

7.1.1 Trieda 1

Do tejto kategórie patria nízkoenergetické lasery používané v mapovacích zariadeniach, tlačiarňach, CD a DVD mechanikách. V tejto triede môžu byť zahrnuté aj zariadenia s vyšším výkonom, kde je riziko poranenia vylúčené tým, že je laser uzavretý v prístroji tak, že sa k nemu nie je možné dostať bez demontáže zariadenia. Patria sem všetky lasery, ktoré sú s veľkou pravdepodobnosťou bezpečné i pri použití optických prístrojov.[38]

7.1.2 Trieda 1M

Sem patria lasery, ktoré je bezpečné používať za predpokladu, že nepoužívame pri sledovaní lúča optické prístroje ako sú aj okuliare. Príkladom je skener čiarových kódov kde expozícia nepresahuje 1000 sekúnd.[16]

7.1.3 Trieda 2

Zaraďujeme sem lasery, využívajúce viditeľné svetlo. Oko dokáže pri viditeľnom spektre zaistiť ochranu zraku žmurkaním a zužovaním zrenice i v prípade pozorovania optickým prístrojom. Patria sem napríklad ukazovadlá.[38]

7.1.4 Trieda 2M

Táto trieda zahŕňa lasery, pracujúce vo viditeľnom spektre svetla. Oko má schopnosť fyzicky regulovať intenzitu. Sledovanie optickým prístrojom je však už nebezpečné.[38]

7.1.5 Trieda 3A

Patria sem zariadenia, pre ktoré platí, že sledovanie ich lúča je nebezpečné, nie však až v takej miere, ako zdroje žiarenia triedy 3B a 4.[38]

7.1.6 Trieda 3B

Sem patria lasery, pri ktorých je ožiarenie nebezpečné aj za normálnych podmienok. Hrozí trvalé poškodenie zraku.[38]

7.1.7 Trieda 4

Do tejto triedy patria lasery, pri ktorých sú nebezpečné aj odrazy - môžu spôsobiť poškodenie pokožky, popáleniny alebo požiar.[38]

7.2 Najvyššie prípustné hodnoty nekoherentného optického žiarenia

Najvyššie hodnoty pre optické žiarenie sú definované v nariadení vlády o ochrane zdravia pred neionizujúcim žiarením č. 291/2015 Sb. Typy optického žiarenia sú vymedzené podľa vlnových dĺžok na ultrafialové typu A,B a C, viditeľné a infračervené typu A,B a C vid' tab. 7.3.[39]

Vlnová dĺžka [nm]	180-280	280-315	315-400	400-780	780-1400	1400-3000	3000-10 ⁶
Typ žiarenia	Ultrafialové			Viditeľné	Infračervené		
	C	B	A		A	B	C

Tabuľka 7.3: Rozdelenie optického žiarenia

Rádiometrické hodnoty kvantifikujú a opisujú niektoré aspekty oblasti žiarenia. Neurčujú však účinky žiarenia na biologický cieľ. Napríklad, ožiarenosť 1 Wm^{-2} s vlnovou dĺžkou 270 nm je nebezpečnejšia pre rohovku než 1 Wm^{-2} s vlnovou dĺžkou 500 nm. Ultrafialové žiarenie s vlnovou dĺžkou do 300 nm je vo veľkej miere absorbované na rohovke, spojovke a sklovci. UVC lúče sú pohlcované vrchnými vrstvami rohovky a UVB lúče rohovkou a šošovkou. UVA lúče prechádzajú rohovkou a sú pohlcované šošovkou. V ultrafialovej oblasti žiarenia je najzávažnejšia pre možné poškodenie oka práve vlnová dĺžka 270 nm, ktorá patrí medzi ultrafialové žiarenie typu C. S rastúcou vlnovou dĺžkou prudko klesá biologická účinnosť pôsobenia ultrafialového žiarenia. Žiarenie prestáva byť absorbované v rohovke, šošovke a sklovci ale preniká na sietnicu, ktorú najviac ohrozuje svetlo vo viditeľnom spektre. Infračervené svetlo dokáže spôsobiť poškodenie oka kvôli tepelným účinkom tohto žiarenia. Ohrozená je aj sietnica oka pretože nie je chránená žmurkacím reflexom, ktorý býva oneskorený o 0,25 sekundy, ako v prípade viditeľného svetla. Nehrozí však fotochemické poškodenie.[40]

Vlnová dĺžka [nm]	Nejvyššia prípustná hodnota	Jednotky	Časť tela	Riziko
180 - 400	30 $t < 8$ hodín	$J \cdot m^{-2}$	očná rohovka, spojovka, šošovka, koža	fotokeratitída, zápal očnej spojovky, kataraktogenéza, erytém, elastóza, rakovina kože
315 - 400	10000 $t < 8$ hodín		očná šošovka	kataraktogenéza
300 - 700	0,01 $t > 10000s$	$W \cdot m^{-2}$	sietnica	popálenie sietnice
380 - 1400	$2,8 \cdot 10^7 \cdot C \alpha^{-1}$ pre $t > 10s$	$W \cdot m^{-2} sr^{-1}$		
780 - 1400	$6 \cdot 10^6 \cdot C \alpha^{-1}$ pre $t > 10s$	$W \cdot m^{-2} sr^{-1}$		
780 - 3000	100 pre $t > 1000 s$	$W \cdot m^{-2}$	Rohovka, šošovka	Popálenie rohovky, zákal
380 - 3000	$20000 \cdot t^{0,25}$ pre $t < 10s$	$J \cdot m^{-2}$	koža	popálenie
Poznámka pre 380-1400 nm $C\alpha = 1,7$ pre $\alpha \leq 1,7$ mrad $C\alpha = \alpha$ pre $1,7 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C\alpha = 100$ pre $\alpha > 100$ mrad				
Poznámka pre 780-1400 nm $C\alpha = 11$ pre $\alpha \leq 11$ mrad $C\alpha = \alpha$ pre $11 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C\alpha = 100$ pre $\alpha > 100$ mrad				

Tabuľka 7.4: Najvyššie prípustné hodnoty nekoherentného optického žiarenia

8 Simulácia a návrh optického vysielача na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

Pre úsporu času a prostriedkov je výhodné nasimulovať nami plánovaný návrh optického vláknového vysielача vo virtuálnom prostredí. Tu môžeme jednoducho meniť rôzne parametre ako napríklad uhly a zakončenia optických vlákien a tým optimalizovať výstupnú intenzitu. Môžeme tak venovať viac času na návrh systému a menej na manuálne inštalačné úlohy.

8.1 Program LightTools

Lighttools je softvér od firmy Synopsys, ktorý slúži na 2D a 3D návrh, simuláciu, vizualizáciu a vykresľovanie svetla a optických súčiastok. Dokáže vykonať analýzu zmien výkonnosti založenú na chybách, ktoré môžu nastať pri výrobnom procese.

Kľúčovými prvkami sú: modelovanie s plnou optickou presnosťou efektov (ako je polarizácia, rozptyl, reflexia, refrakcia a môžu byť zahrnuté aj materiálne efekty, ako je disperzia, objemová absorpcia, rozptyl objemu a filtrovanie farieb), tvorba svetelných zdrojov z ľubovoľného geometrického tvaru, nástroje, ktoré umožňujú jednoducho vytvárať rôzne modely, kompatibilita s formátom CAD, kompatibilita s nástrojmi Microsoft Excel, výpočet indexu, fotometrických a rádiometrických veličín, rozsiahla knižnica súčiastok a používaných materiálov (viac ako 2500 sklenených materiálov, 1800 katalógových šošoviek, 40 povrchových úprav, 30 plastových materiálov, viac ako 390 zdrojov pre automobilové a LED aplikácie, filmy na zlepšenie zobrazenia (DEF), vrátane filmov na zvýšenie jasu (BEF), reflexných polarizátorov BEF a sústružníkových fólií, viac ako 90 predpripravených systémov pre automobilový priemysel, podsvietenie, digitálny projektor, zobrazovanie, LED, svetelné trubice, všeobecné osvetlenie a aplikácie s tmavým svetlom). Nechýba tu ani možnosť vytvárať a pridávať aj vlastné materiály. Tieto robustné schopnosti programu nám umožňujú dosiahnuť ciele výkonnosti od farebnej jednotnosti až po kvalitu a sýtosť.[41]

LightTools sa skladá z viacerých modulov, ktoré sú licencované zvlášť.

- Core Modul tvorí základ, ktorý poskytuje grafické rozhranie a nástroje pre modelovanie 3D objektov na virtualizáciu optických a opto-mechanických systémov.
- Osvetľovací modul umožňuje simulovať a analyzovať svetlo, ktoré prechádza rôznymi prostrediami a vplyvmi na svetlo. Tiež nám umožňuje zobrazit' geometrický model trasy lúčov svetla.
- Optimalizačný modul umožňuje na základe zmeny flexibilných premenných automaticky zvýšiť kritériá navrhovaného systému. Optimalizuje tak optickú sústavu za zlomok času.
- Pokročilý dizajnový modul využíva patentované algoritmy produktov LucidShape® firmy Synopsys, ktoré dokážu vypočítať a vytvoriť optické geometrické tvary, ktoré vyhovujú zadaným požiadavkám na osvetlenie.

Simulácia a návrh optického vysielача na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

- Pokročilý fyzikálny modul poskytuje možnosť vývoja pokročilých optických podsystemov a komponentov vlastnej polarizácie, rozptyľovače, špeciálne nátery a materiály s gradientným indexom používané v kopírovacích strojoch, skeneroch a optických prístrojoch telekomunikačné systémy.
- SOLIDWORKS linkový modul umožňuje prepojiť 3D opto-mechanické modely SOLIDWORKS s LightTools, kde môžete priradiť optické vlastnosti a optimalizovať dizajn pomocou optimalizačného modulu.
- Moduly na výmenu dát umožňujú import a export pre štandardné formáty súborov CAD, STEP, SAT IGES, CATIA®, V4 a V5
- Modul ciest k obrázku umožňuje zobrazenie cesty k obrázku a analýzu šošoviek, bodový diagram a grafy s priečnymi aberáciami.[42]

V mojom prípade používame LightTools 8.6.0 verzia: 2018.05.14.1311.10051919 [x64], ktorý je licencovaný a nainštalovaný na servery patriacom škole.

8.2 Postup simulácie

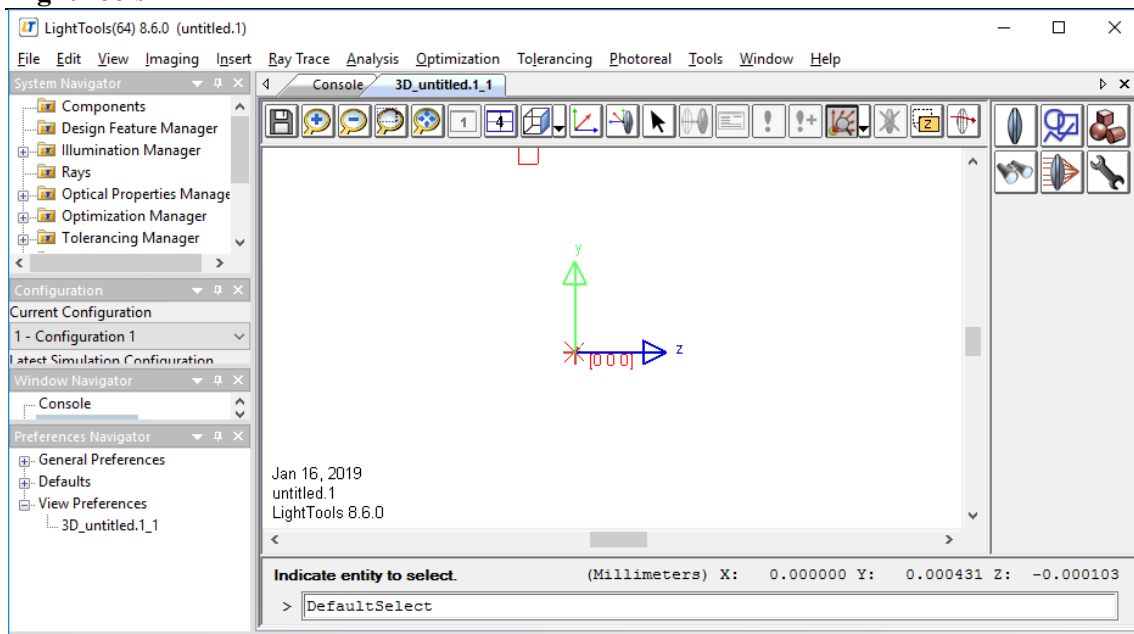
Táto práca je zameraná na optimalizáciu a zhodnotenie optického vláknového vysielача s ohľadom na zakončenie vlákien v počte 7 a 19. Tento počet bol zvolený kvôli efektívnemu zaplneniu a rozloženiu vlákien v segmente, čo bolo dokázané už v práci Dr. Látala popisovanej v kapitole 6.4. Umožní to aj lepšie vzájomné porovnanie. Pre postup simulácie je potrebné poznať parametre optických komponentov, ktoré budú simulované a následne reálne testované.

8.2.1 Vytvorenie optického vlákna

Na stránke výrobcu vlákna je možné dohľadať informácie o vlákne. Použité vlákno s obchodným označením HCG-M0550T, viac v kap.6.4, ktoré budem používať je multimódové s numerickou apertúrou 0,22. Chýbajú tu však informácie o indexe lomu jadra a plášťa, čo však nie je výnimkou pretože výrobcovia optických vlákien zvyknú udávať iba údaj o numerickej apertúre. Po kontaktovaní firmy OFS Fitel, LLC., od ktorej bolo optické vlákno zakúpené nám boli tieto informácie napokon poskytnuté. Index lomu jadra je: 1,457 a index lomu v prípade plášťa je: 1,440 Tento typ vlákna má okrem jadra a plášťa ešte dve vrstvy ochranného obalu. Tie však budú odstránené kvôli zvýšeniu efektivity a intenzity svetla naviazaného zo svetelného zdroja a fokusovaného pomocou optickej šošovky. Preto v simulácii nastavíme iba priemer jadra na 550 μm a priemer plášťa na 600 μm . [34]

Na obrázku 8.1 je zobrazené úvodné rozhranie programu LightTools, ktoré sa vyobrazí po otvorení programu.

Simulácia a návrh optického vysielача na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools



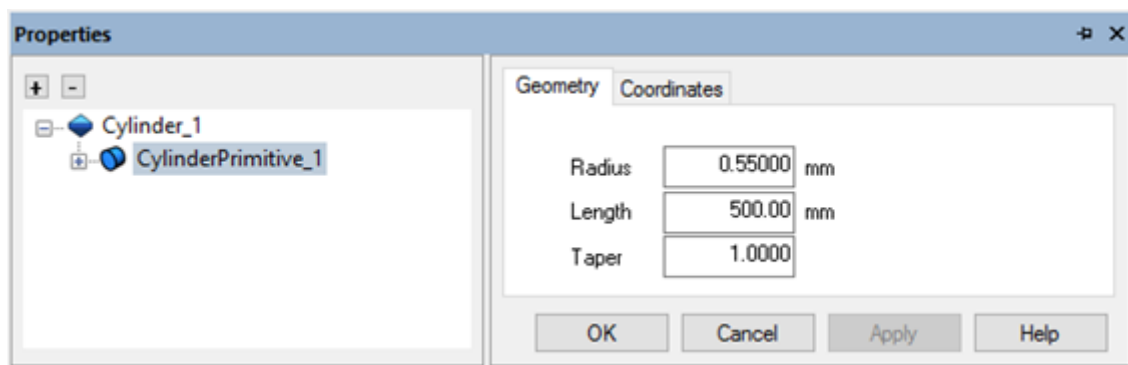
Obrázok 8.1: LightTools rozhranie

Pre vytvorenie optického vlákna musíme nájsť geometrický tvar valec, ktorý zodpovedá tvaru vlákna. V pravom hornom rohu rozklikneme ikonu "Elements". Po tomto kroku sa nám zobrazí výber prvkov, z ktorých si vyberieme "3D Objects". Zobrazí sa nám ponuka 3D objektov, ktoré môžeme vytvoriť. Spomedzi nich si vyberieme "Cylinder", postup vid' obr. 8.2.



Obrázok 8.2: Vytvorenie tvaru vlákna

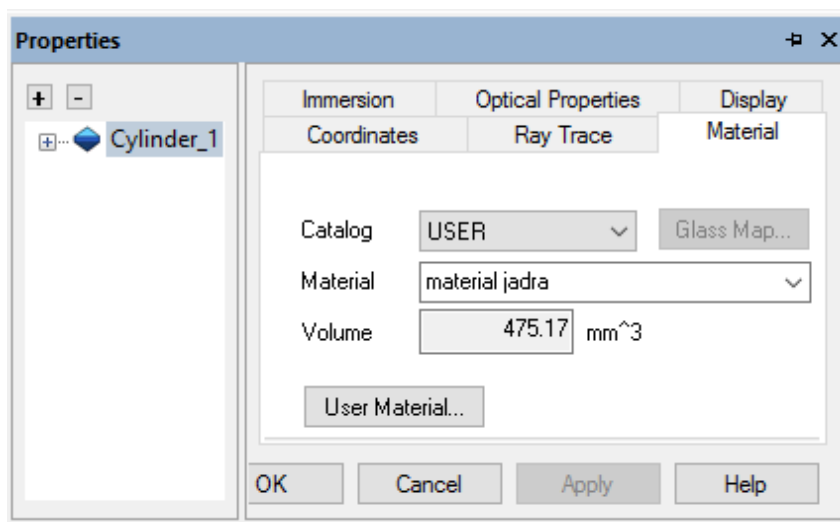
Máme teda zvolený geometrický tvar a následne ho vytvoríme tak, že klikneme na pracovnú plochu programu. Potiahnutím myši a kliknutím nastavíme priemer valca a ďalším potiahnutím myši a kliknutím jeho dĺžku. Tieto hodnoty však jednoducho zmeníme po rozkliknutí položky "Cylinder 1" v okne "System Navigator" zmenením hodnôt "CylinderPrimitive_1" podľa požadovaných parametrov na dĺžku 50 cm a priemer 550 μm ako môžeme vidieť na obrázku 8.3.



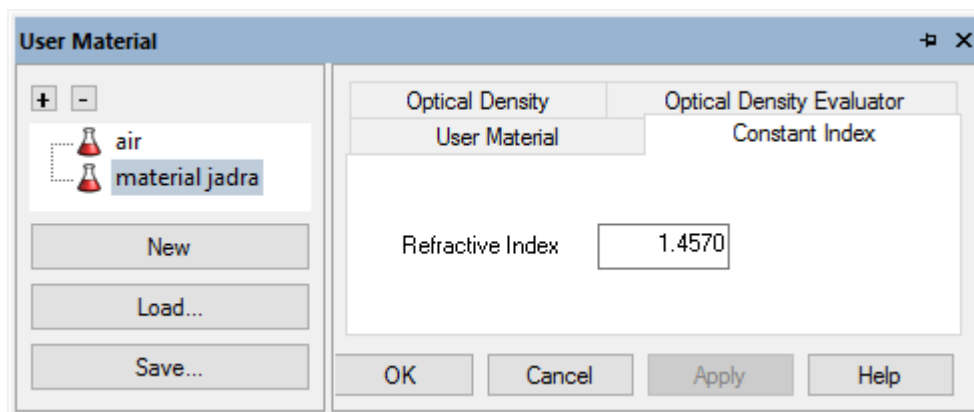
Obrázok 8.3: Nastavenie rozmerov jadra vlákna

Simulácia a návrh optického vysielачa na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

Keďže materiál vlákna nie je v knižnici LightTools, vytvoríme si vlastný materiál pre vlákno s požadovaným indexom lomu. Túto možnosť nájdeme vo vlastnostiach vytvoreného jadra vlákna "Cylinder_1" po rozkliknutí "User Material..." vid' obr. 8.4. V novom okne, ktoré sa otvorí, klikneme na "New" a v karte "Constant Index" zadáme hodnotu indexu lomu jadra vlákna vid' obr.8.5. Materiál som pomenoval *material jadra*. Následne je potrebné tento materiál objektu aj priradiť. V zozname "Catalog" nájdeme "USER" a v poli "Material" vyberieme nami vytvorený materiál vid' obr.8.4.



Obrázok 8.4: Nastavenie materiálu jadra vlákna



Obrázok 8.5: Nastavenie indexu lomu pre vlastný materiál

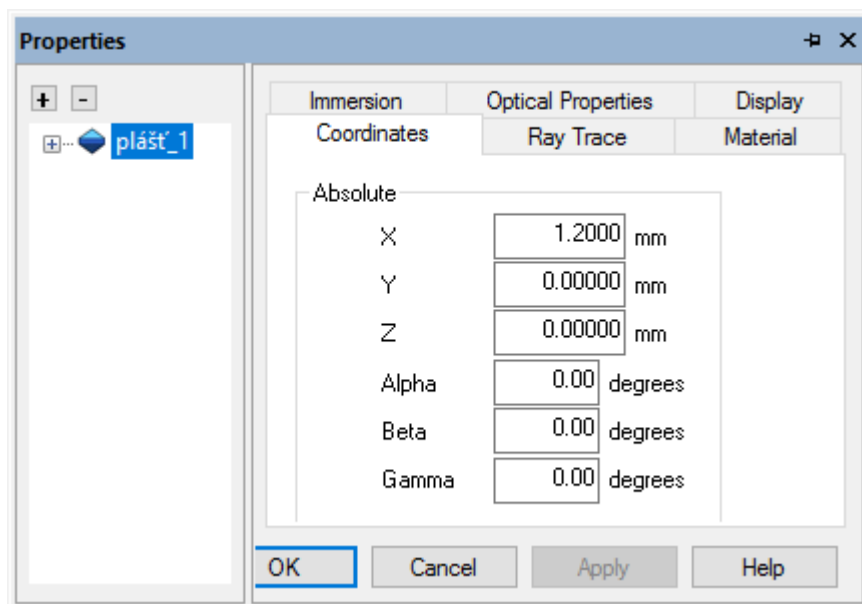
Obdobným spôsobom vytvoríme aj plášť vlákna s priemerom 600 μm a materiálom, ktorý bude mať index lomu 1,440. Na to, aby som vytvoril plášť ako trubicu, v ktorej je jadro, využijem funkciu "Subtract", ktorá odstráni z existujúceho objektu objem druhého objektu, ktorý doňho zasahuje. Túto funkciu nájdeme v panely nástrojov cez "Modifying" a "3D Editing". Pre vytvorenie samotného plášťa v podobe trubice z valca označíme v "System Navigator"

Simulácia a návrh optického vysielача na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

komponenty plášť a jadro a stlačíme "Subtract". Odčítava sa objem druhého označeného objektu od prvého. Preto je dôležité poradie. Následne musíme jadro opäť pridať.

Materiál jadra a plášťa spolu previažeme a zároveň takto vytvoríme z týchto dvoch objektov jeden, tým že sa zaradia do jednej skupiny. Dosiahneme toho označením jadra a plášťa v "System Navigator" a v panely nástrojov cez "Modifying" a následne "Element Editing" klikneme na ikonu "DeclareContact".

Keďže budeme simulovať sústavu so 7 a 19 optickými vláknami, využijeme možnosť kopírovať vytvorené objekty. V "System Navigator" označíme objekt, ktorý chceme skopírovať kliknutím myši a v menu "Edit" zvolíme "Copy Geometry". Vložíme skopírovaný objekt cez "Edit" a zvolíme "Paste Geometry". Objekt sa však vloží na rovnaké miesto, kde sa nachádzal originál kópie. Túto polohu zmeníme v "System Navigator" pre objekt jeho rozkliknutím a nastavením polohy súradníc x, y a z v "Coordinates" vid' Obr. 8.6.

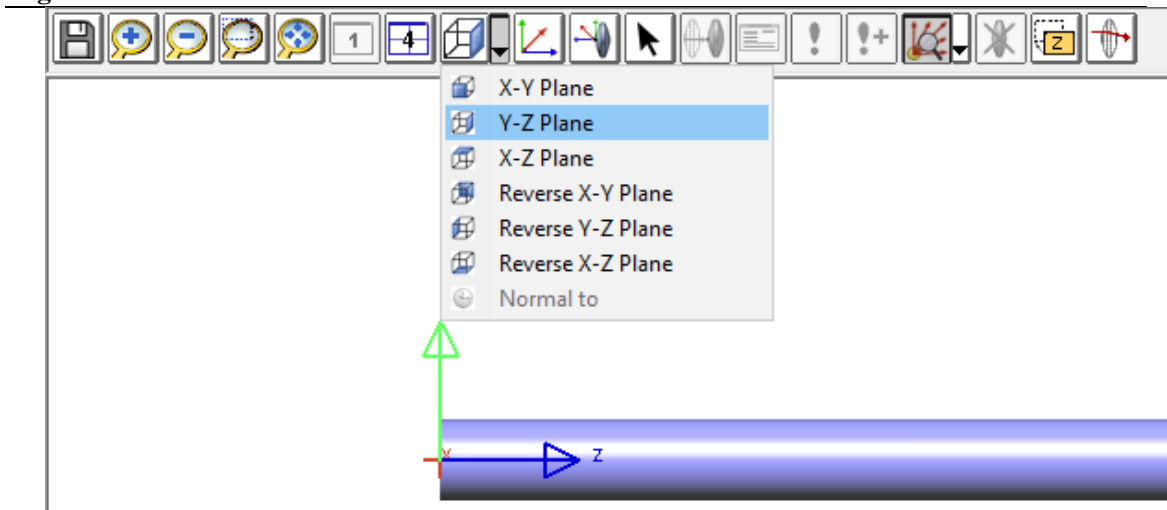


Obrázok 8.6: Nastavenie súradníc

8.2.2 Zobrazenie objektu

Meniť smer pohľadu na vytvorené objekty je možné po kliknutí na "UCYZ view" alebo stlačením kolieska myši a jej následným pohybom. Na obrázku 8.7 je zobrazený pohľad Y-Z.

Simulácia a návrh optického vysielачa na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools



Obrázok 8.7: Zobrazenie objektu

8.2.3 Vysielač a naviazanie svetla do vlákien

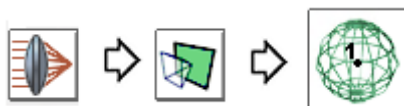
Vysielačom svetla budú LED diódy od firmy OSRAM: LR G6SP-CBEA-1-1 so svietivosťou 12100-24200 mlm, vyžarovacím uhlom 120° a vlnovou dĺžkou 620 - 629 nm. LA G6SP-DAFA-24-1 so svietivosťou 15100-37800 mlm, vyžarovacím uhlom 120° a vlnovou dĺžkou 612-624 nm. LED diódy s takýmito vlastnosťami sú vhodné pre použitie v rámci VLC pretože pracujú v oblasti viditeľného svetla. Navyše je veľkosť čipu vhodná pre efektívne naviazanie svetla do vlákna.

LED diódu vložíme cez knižnicu diód, ktorú nájdeme cez menu preklikom v "Tools" na "LED Library..." Kde vyhľadáme a označíme požadovaný model LED diódy a pridáme ho tlačidlom Create LED.

Súradnice LED diód definujeme tak, aby boli umiestnené čo najbližšie ku stredu osi jadra vlákna. Keďže vlákna majú dostatočnú hrúbku a teda aj NA, nebudeme používať žiadne ďalšie optické prvky pre naviazanie svetla do vlákna.

8.2.4 Detektor

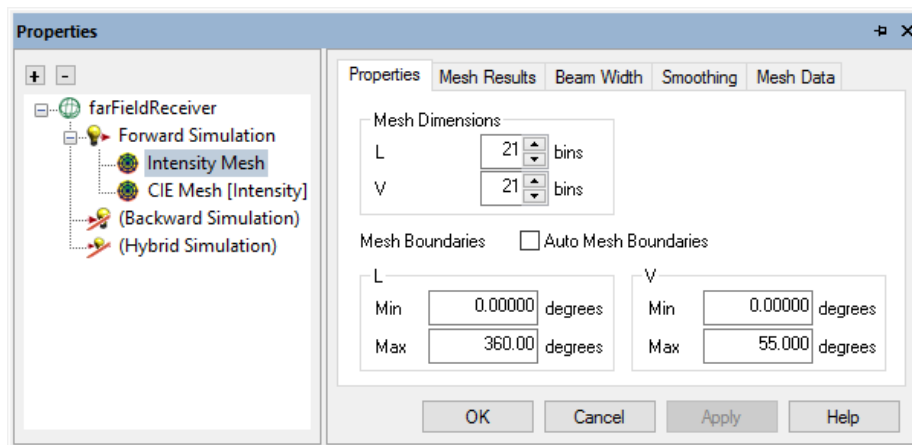
Pre príjem a analýzu signálu musíme umiestniť plochu, na ktorej budeme analyzovať dopadajúce svetlo. Túto plochu vyberieme cez "RayTracing", z rozbalených ikon vyberieme „Receivers“, kde z ponuky zvolíme "AddFarFieldReceiver" vid' obr. 8.8. Tento výber umiestnime kliknutím na požadované miesto. Tento prijímač som vybral pretože je jediným z ponuky ktorému je možné upraviť tvar tak, aby bol čo najpodobnejší na skutočnú plochu prijímača tvaru osminy gule.



Obrázok 8.8: Pridanie detektoru

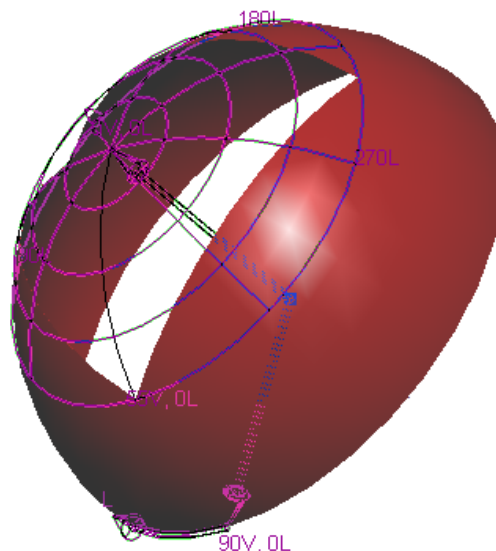
Simulácia a návrh optického vysielacza na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

Polomer prijímača "farFieldReceiver" nastavíme na 326 mm čo zodpovedá polomeru gule obvodu 205 cm, ktorej polomer je 32,62 cm. Plochu prijímača upravíme na rozmery čo najviac sa podobajúce reálnemu prijímaču v Mesh Boundaries, kde nastavíme maximálnu hodnotu V na 55 stupňov vid' obr. 8.9.



Obrázok 8.9: Nastavenie prijímača

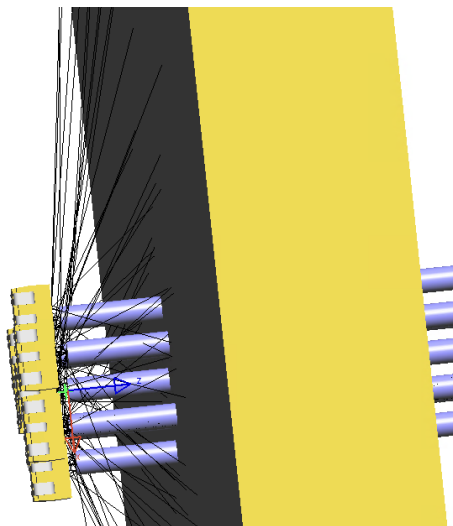
Keďže nebol nájdený spôsob, ako by bola plocha prijímača presne v tvare osminy gule, ktorá bude použitá pri experimentálnom meraní, bude plocha, kam budú dopadať lúče upravená na tento tvar pomocou tienidla. To bolo vytvorené pomocou viacerých geometrických tvarov a funkcie "Subtract", použitej podobne ako v kapitole 8.2.1. Výslednú prijímaciu plochu spolu s tienidlom možno vidieť na obr. 8.10.



Obrázok 8.10: Tienidlo a prijímač

8.2.5 Odfiltrovanie svetla LED diód

Kvôli priamej viditeľnosti LED a prijímača v tejto simulácii, je vhodné zamedziť dopadu tých lúčov, ktoré sa nešíria vláknom. Na odfiltrovanie týchto lúčov som použil objekt v tvare kvádra, ktorý som v primeranej vzdialenosti a rozmeroch umiestnil medzi LED diódy a prijímač vid' obr. 8.11. Vytvorenému objektu slúžiacemu na filtrovanie bola nastavená vlastnosť absorpcia, tak, že po nájdení objektu v "System Navigator" v priečinku "Components" klikneme na daný objekt, vyberiem "Edit All Descendants" kde v "Optical Properties" zvolíme "Optical Absorber" čo zamedzuje odrazu lúčov od objektu.



Obrázok 8.11: Filter svetla LED

8.2.6 Optimalizácia náklonu vlákien pre rovnomerné rozloženie na ploche detektoru

Jedným spôsobom, ako nájsť optimálne rozloženie intenzity na osmine gule, je vytvoriť zdroje žiarenia, ktoré budú mať vlastnosti zhodné s koncami optických vlákien. Takéto zdroje vytvoríme klikom cez ikonu "Ray Tracing" ďalej "Source Sources" kde zvolíme "DiskSource". Po rozkliknutí tohto zdroja nastavíme v Properties v okne "Geometry" položke Radius hodnotu priemeru vlákna. V "Aim Shere" nastavíme Lower uhol na toľko stupňov, v koľkých by optické vlákno svetlo vyžarovalo. Tento uhol vypočítame podľa vzorca o NA vlákna vid' vzorec (2.3), ktorá je 0,22. Uhol teda nastavíme na 12,7 stupňov. Pri zmene orientácie a polohy sledujeme výsledky prijímanej intenzity. Toto je ale v podstate ručná optimalizácia, pri ktorej nevyužívame schopnosť programu hľadať optimálne parametre na základe podmienok, ktoré určíme. Vytvoreným vláknam môžeme nastaviť hodnotu uhlu natočenia ako variabilnú premennú. Túto možnosť nájdeme v "Properties" daného objektu po kliknutí pravým tlačidlom na pole kam sa zadávajú dané hodnoty. Čísla, pre ktoré je nastavená variabilná premenná majú červenú farbu.

Pre nastavenie cieľa pre ktorý bude optimalizácia vykonávaná musíme v "System Navigator" nájsť priečinko "Receiver List", v ktorom rozklikneme "Forward Simulation" a pravým kliknutím na "Intensity Mesh" klikneme na "Add Optimization Mesh Merit Function". Túto optimalizačnú funkciu nájdeme v priečinku "Merit Function", ktorý je podpriečinkom v

Simulácia a návrh optického vysielacza na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

"Optimization Manager". Po rozkliknutí tejto funkcie nastavíme v okne "Mesh Data" "Target function" na "Uniform".

Na to, aby sa spolu s vláknom natáčala aj dióda v rovnakom uhle som vlákno aj diódu zlúčil do jedného objektu tak, že som ich zlúčil do jednej skupiny. Objekty môžeme zlúčiť do jednej skupiny tak, že si v "System Navigator" označíme objekty, ktoré chceme v zlúčiť a v panely nástrojov prejdeme cez "Modyfying a Grouping" na "Group" vid' obr. 8.12.



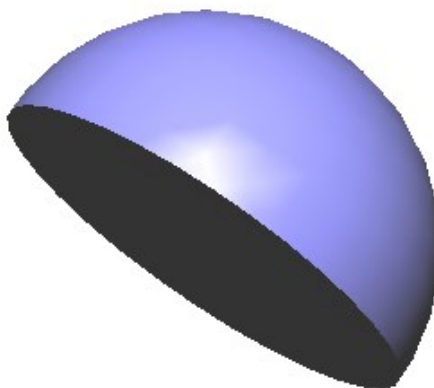
Obrázok 8.12: Zoskupenie objektov

8.2.7 Spustenie simulácie

V menu klikneme na "Ray Trace". Rozbalí sa ponuka, kde vyberieme možnosť "Begin All Simulation". Simulácia sa spustí a podľa náročnosti simulácie na výpočtový výkon bude závisieť čas jej dokončenia. Cez "Ray Trace" v "Simulation Input..." Môžeme nastaviť počet lúčov, ktoré budú simulované. Čím viac lúčov, tým by mali byť výsledky presnejšie, ale aj optimalizácia a samotná simulácia má vyššie hardwarové a teda aj časové nároky. Nastavil som hodnotu 1000000. Po dokončení simulácie môžeme v karte "Analysis" nájsť parametre, ktoré chceme analyzovať.

8.2.8 Tvorba optických zakončení pre vlákna

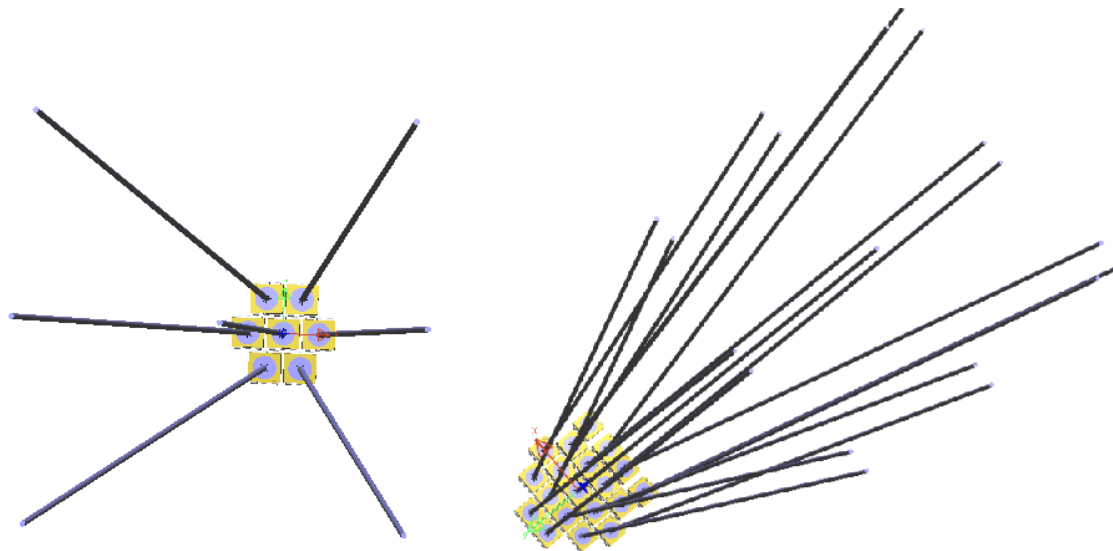
Zakončenie optických vlákien bude vytvárané z materiálu PDMS, viac v kap. 9.1.3. Preto po vytvorení požadovaného tvaru zakončenia je potrebné nastaviť index lomu materiálu tohto objektu na 1.42, čo je index lomu materiálov vytvorených z PDMS. Vytvorené zakončenie bude mať priemer 600 μm a bude zoskupené do jedného objektu s vláknom, a LED diódov. Na obr. 8.13 je zobrazené zakončenie tvaru polgule, vytvorené pomocou objektu guľa, kváder a funkcie "Subtract".



Obrázok 8.13: Zakončenie vlákna

8.3 Výsledky simulácií

Jedná sa o simulácie vysielacza pri rôznych konfiguráciách. Bolo simulovaný 7 a 19 vlákien usporiadaných do kruhu so stabilným vláknom uprostred podobne ako v kap. 6.4. vid' obr. 8.14. Testované boli dva druhy LED diód, od firmy OSRAM. LR G6SP-CBEA-1-1 a LA G6SP-DAFA-24-1 viac v kap. 8.2.3. V každom prípade boli simulované zakončenia vlákien zarezané do kolmice a zakončené polguľou.



Obrázok 8.14: Usporiadanie vlákien: vľavo 7, vpravo 19

Cieľom bolo dosiahnuť čo najrovnomernejšie pokrytie prijímacej plochy. Dosiahnuť to, som sa snažil vychýlením vlákna z pôvodnej osi. Vlákna boli vychyľované o 1° od 0 do 15° od stredového vlákna, ktoré ostávalo vždy nevychýlené. V nasledujúcich kapitolách budú zhodnotené a uvedené vybrané významné výsledky.

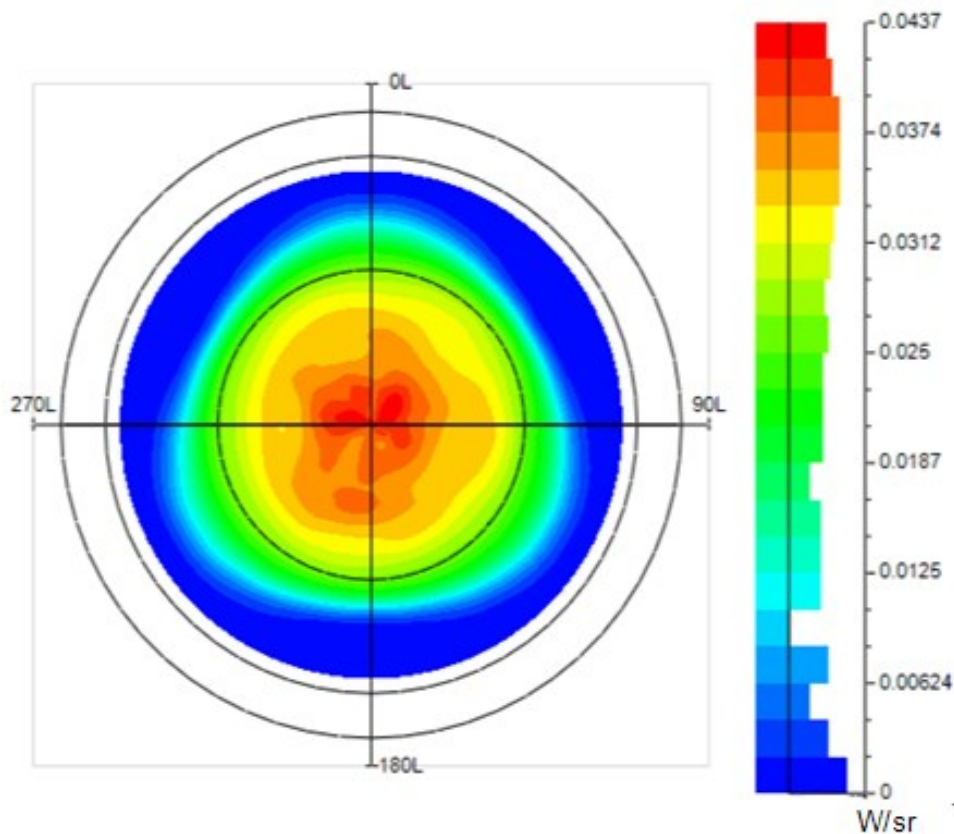
Grafy, ktoré vizuálne analyzujem, nájdeme v LightTools preklikom cez "Analysis", "Intensity Display" v "LumViever".

Grafy rezu intenzít, nájdeme v LightTools preklikom cez "Analysis", "Intensity Display" v "SliceChart". Zároveň sú umiestnené v prílohe B.

Simulácia a návrh optického vysieláča na bázi optických vlákien v softvérovej aplikácii LightTools

8.3.1 Simulácie vysieláča zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

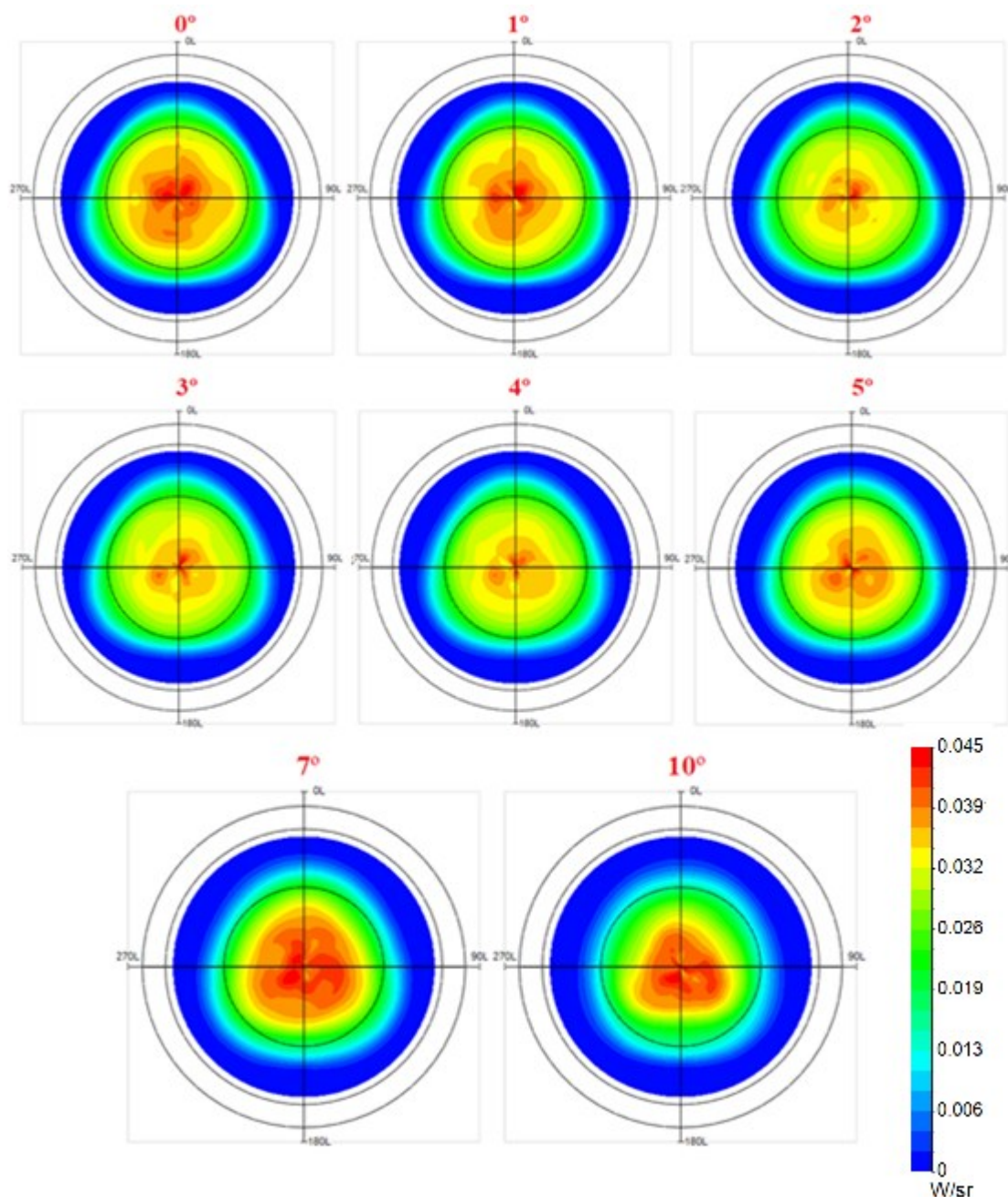
Na obr. 8.15 možno vidieť natočenie vlákien po optimalizácii programom LightTools. Po porovnaní s manuálnym nastavením uhlov náklonu vlákien vidíme, že optimalizácia nie je optimálna. Svetlo sa sústreďuje hlavne v strede.



Obrázok 8.15: Výsledok optimalizácie LightTools

Simulácia a návrh optického vysieláča na bázi optických vláken v softvérovej aplikácii LightTools

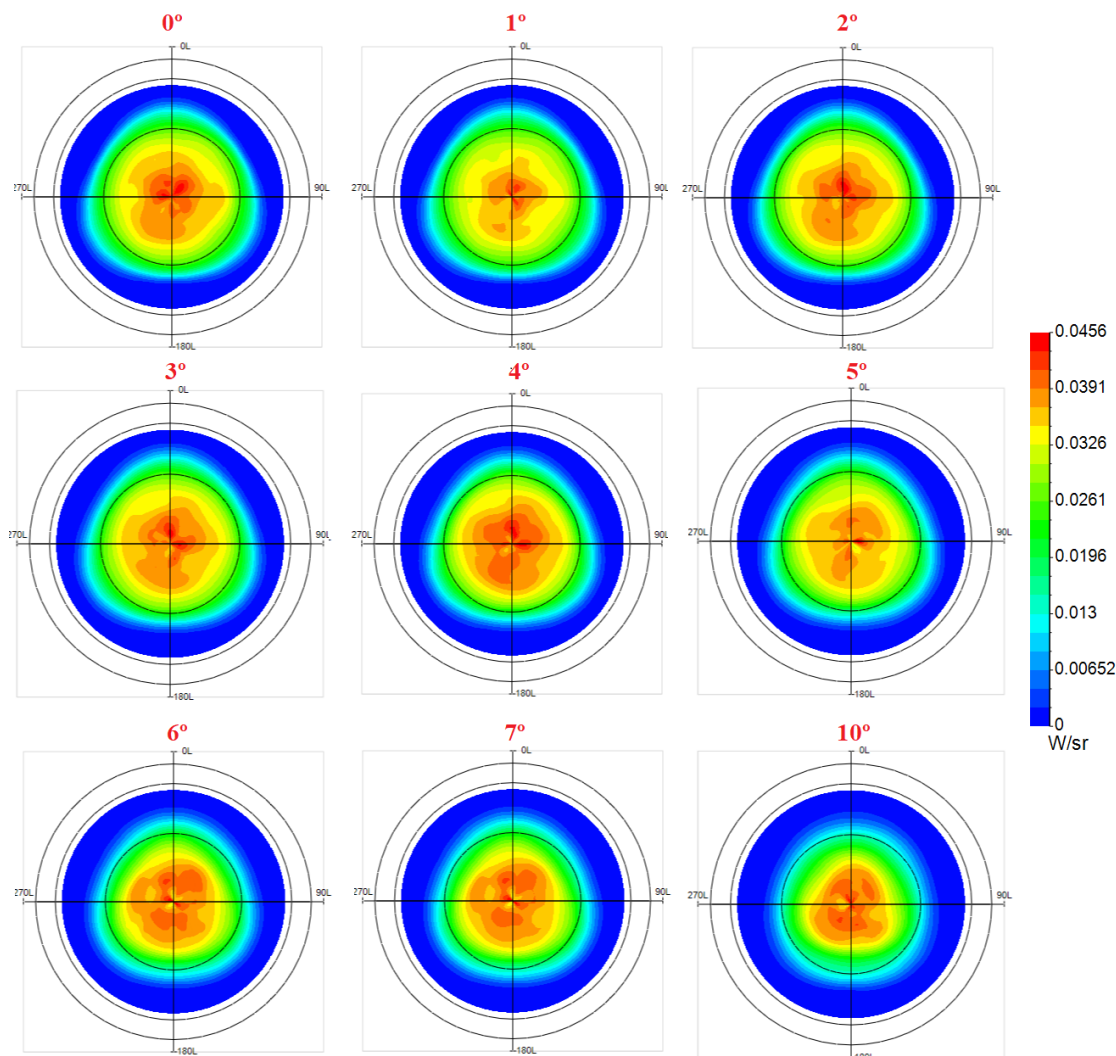
Najideálnejšie rozloženie intenzity nastalo pri 2° . Pri 0° je vysoký rozdiel medzi hodnotami v centrálnej časti a v jej okolí. Pri 1° už nie je vidno tak veľké oblasti s maximálnymi hodnotami v strednej oblasti prijímača. Najoptimálnejší stav nastáva od 2° do 4° pretože plochy, kde sa nachádzajú hodnotové maximá sú najmenšie v porovnaní s ostatnými konfiguráciami. Od 5° sa opäť zvyšuje nerovnomernosť rozloženia intenzity žiarenia, intenzita sa sústreďuje najmä v strede prijímača. Pri ďalšom zvyšovaní uhlov sa zvyšuje rozdiel výkonových úrovní pokrytia prijímača a nastáva osvecovanie plochy mimo prijímača vid' obr. 8.16.



Obrázok 8.16: Simulácie vysieláča zo 7 vláken s kolým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

8.3.2 Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

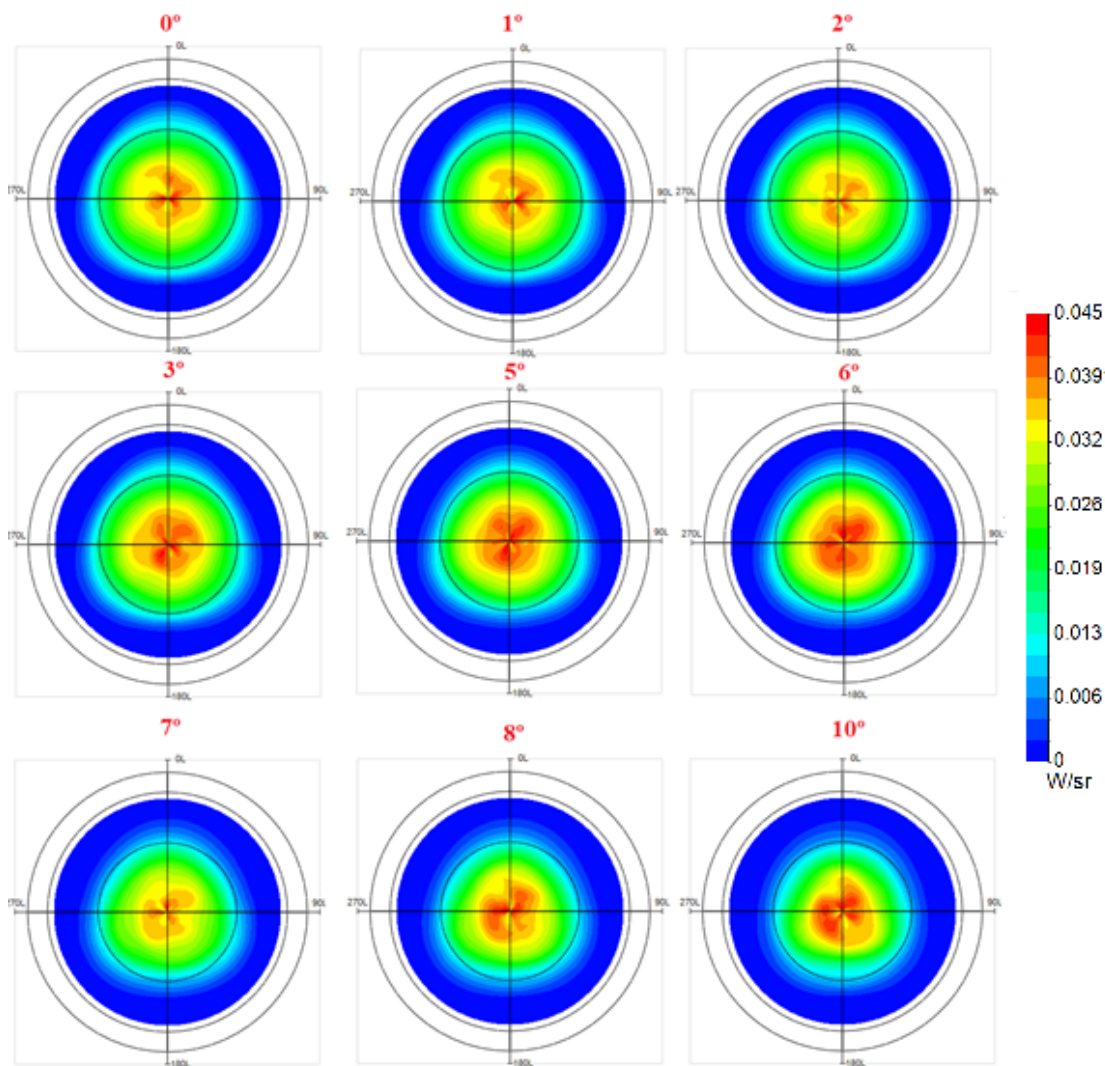
Natočenie vlákien po optimalizácii programom LightTools opäť nie je optimálne po porovnaní s manuálnym nastavením uhlov náklonu vlákien. Najideálnejšie rozloženie intenzity nastalo pri 1° , 2° a 5° . Pri ostatných hodnotách je vidno väčšie oblasti s maximálnymi hodnotami výkonu v strednej oblasti prijímača. Pri hodnote náklonu 0° a 3° stále nie je rozloženie intenzity s veľkými výkyvmi. Pri 4° sa výkon začína viac sústreďovať do centra prijímača. Zaujímavé je zredukovanie množstva dopadajúceho svetla doprostred, ktoré nastáva pri 5° . Od 6° sa však opäť zvyšuje nerovnomernosť rozloženia intenzity žiarenia, intenzita sa sústreďuje najmä v strede prijímača. S každým ďalším pridaním uhlu sa rozloženie výkonu zhoršuje a nastáva osvetľovanie mimo prijímaciu plochu vid' obr. 8.17.



Obrázok 8.17: Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

8.3.3 Simulácie vysielacza zo 7 vláken s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

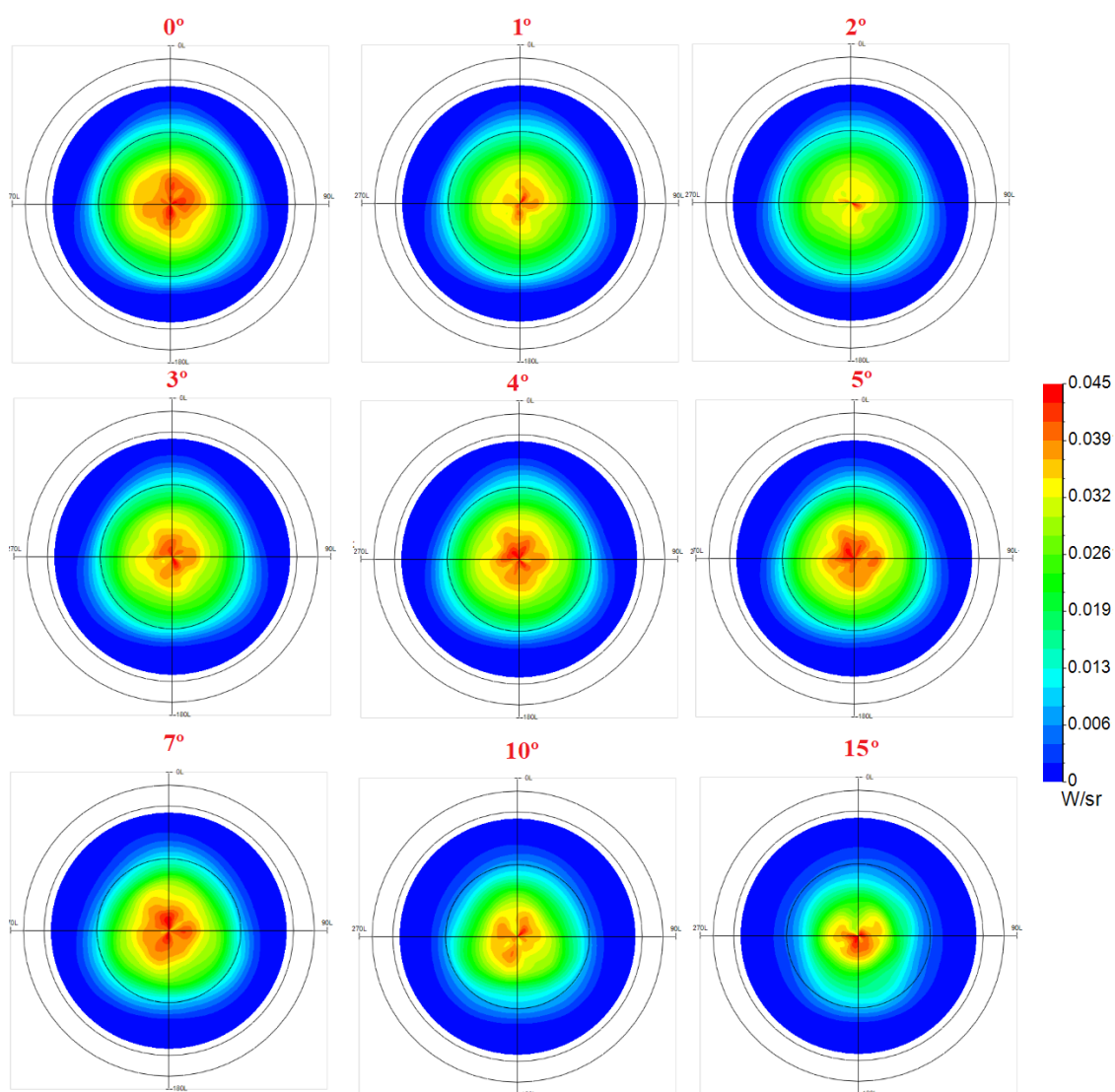
Natočenie vláken po optimalizácii programom LightTools opäť nie je optimálne po porovnaní s manuálnym nastavením uhlov náklonu vláken. Najideálnejšie rozloženie intenzity sa javí pri 2° a 7° . Od 0° do 2° je rozloženie intenzity takmer identické a pri ďalšom zvyšovaní uhlu narastajú oblasti s maximálnymi hodnotami výkonu v strednej oblasti prijímača. Pri 7° nastáva rozloženie podobné rozloženiu ako pri 3° , kedy nie je rozdiel medzi najideálnejším rozložením, ktoré nastalo pri 2° až taký veľký. Tu však treba podotknúť, že väčšia časť svetla vyžaruje mimo osminu gule. Pri následnom zvyšovaní uhlov dopadá stále viac svetla mimo prijímač a prostredné vlákno sa stáva jediným, ktoré výrazne osvetľuje osminu gule vid' obr. 8.18.



Obrázok 8.18: Simulácie vysielacza zo 7 vláken s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

8.3.4 Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

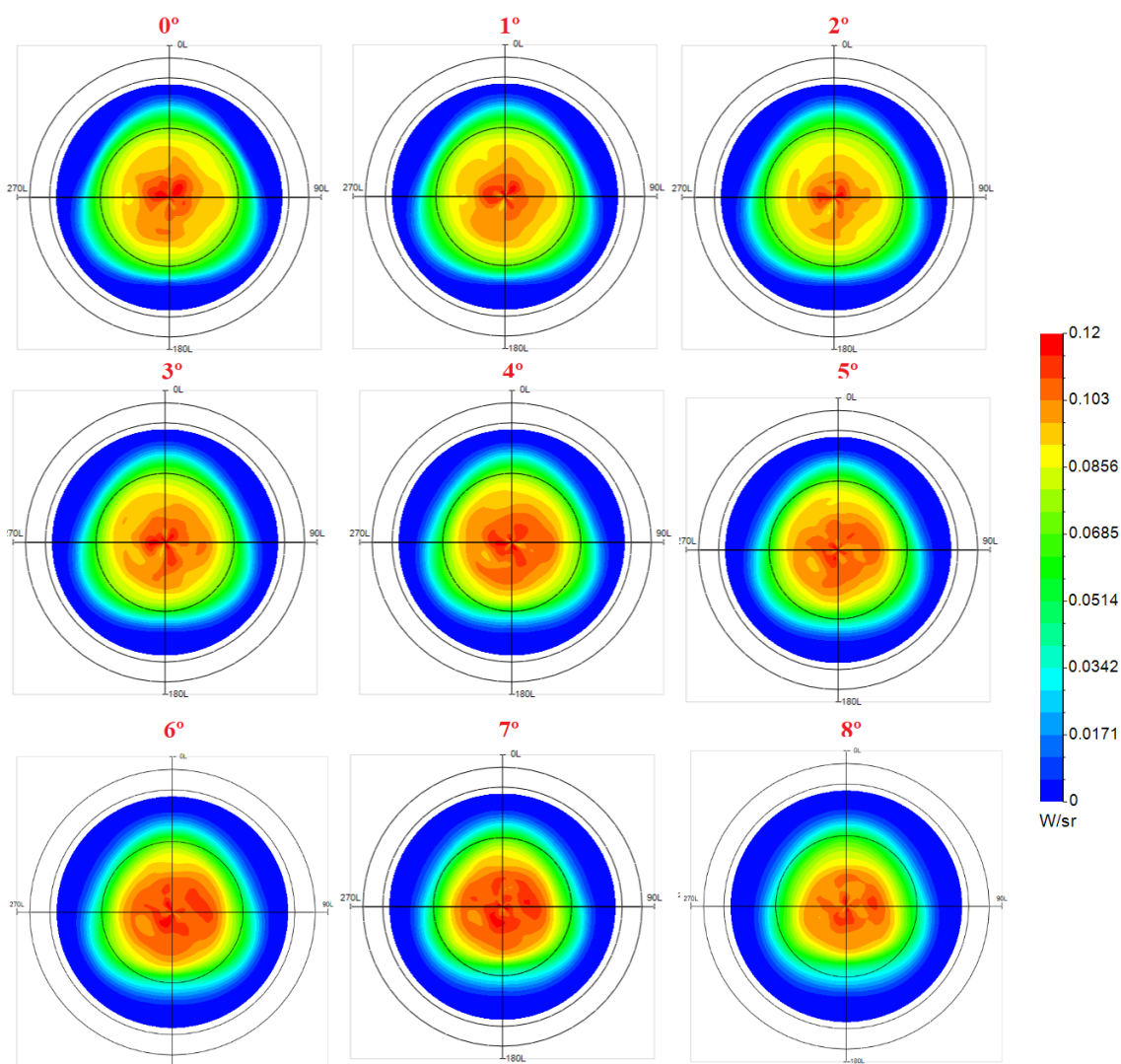
Najideálnejšie rozloženie intenzity nastalo pri 2° , kedy nastáva najideálnejší stav spomedzi simulácií. pretože plocha je pokrytá rovnomerne, bez veľkého rozdielu hodnoty žiarenia svetla v strede a na krajocho. Bez žiadneho natočenia je výkon sústredený najmä v strede. Pri natočení 1° a 3° je rozloženie intenzity pomerne dobré, avšak objavujú sa tu oblasti s vyšším výkonom v centrálnej oblasti. Následne sa so zvyšovaním uhlov zvyšuje aj nerovnomernosť rozloženia intenzity žiarenia so sústredením najmä v strede prijímača. Od 7° je vidno, že vlákna prestávajú osvecovať prijímač pretože sú príliš vychýlené. Prílišné vychýlenie je demonštrované pri 15° kedy na prijímač nedopadajú takmer žiadne lúče s týchto vlákien. Vidno osvetlený iba stred prijímača nevychýleným vláknom vid' obr. 8.19.



Obrázok 8.19: Simulácie vysielacza zo 7 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

8.3.5 Simulácie vysielacza z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

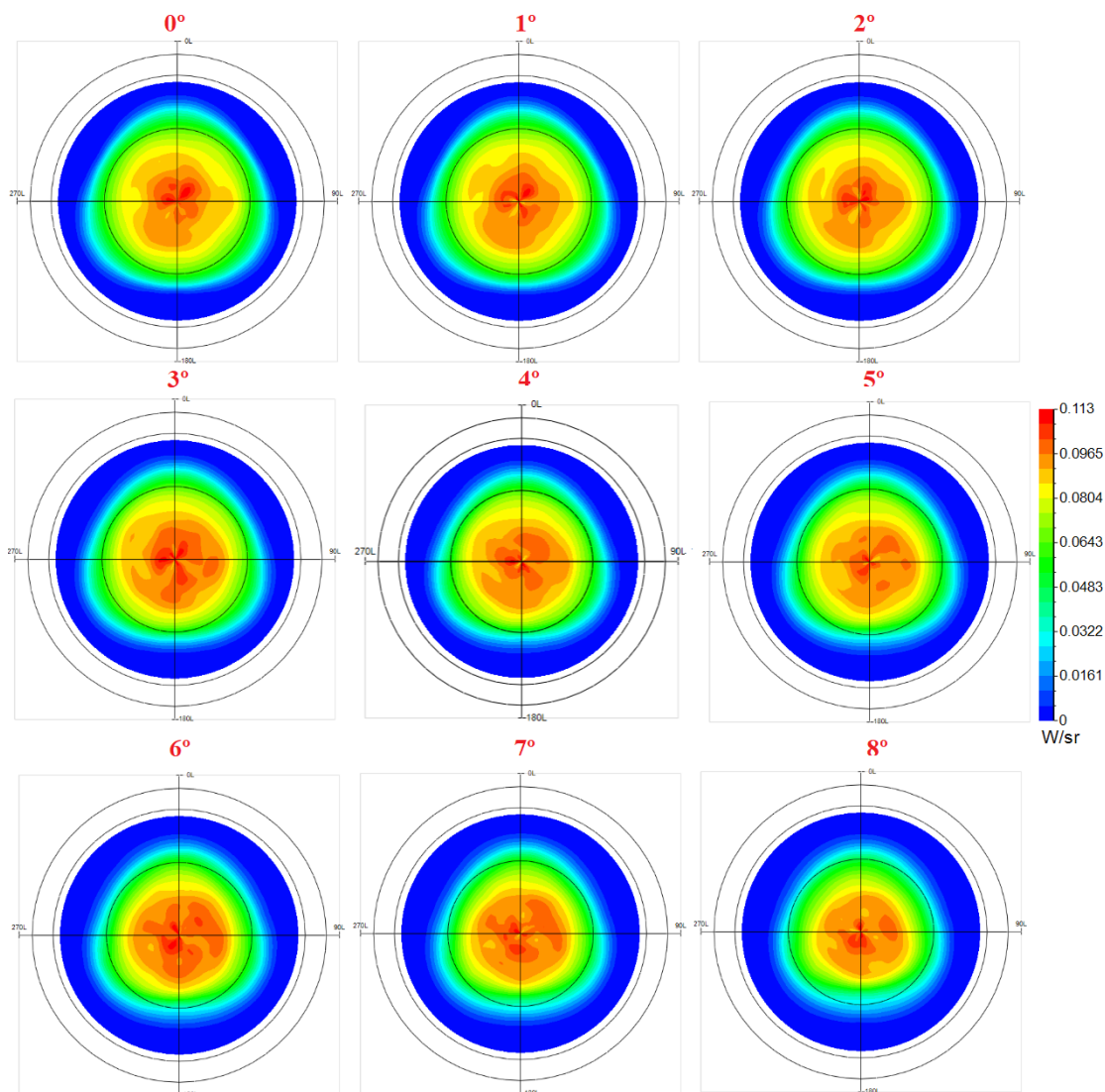
Natočenie vlákien po optimalizácii programom LightTools opäť nie je optimálne po porovnaní s manuálnym nastavením uhlov náklonu vlákien. Najideálnejšie rozloženie intenzity sa javí pri 2° vid' obr. 8.20. Bez natočenia sa nachádza v centrálnej oblasti zväčšená plocha s vysokými hodnotami intenzity. Od 1° do 3° nie je rozloženie intenzity toľko sústredené na stred prijímača ako pri ostatných konfiguráciách. Od 4° sa zväčšuje oblasť s vysokými hodnotami s porovnaním s okrajovými časťami. S ďalším zvyšovaním uhlu narastajú oblasti s maximálnymi hodnotami žiarivosti v strednej oblasti prijímača. Pri 5° nastáva rozloženie podobné rozloženiu ako pri 3°, avšak s menšími oblasťami maximálnych hodnôt a zväčšenou oblasťou so zvýšeným dopadom svetla. Od 6° trend zväčšovania oblastí s vyššou intenzitou v centrálnej oblasti narastá, až napokon dopadá väčšina svetla mimo prijímač.



Obrázok 8.20: Simulácie vysielacza z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

8.3.6 Simulácie vysielacza z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

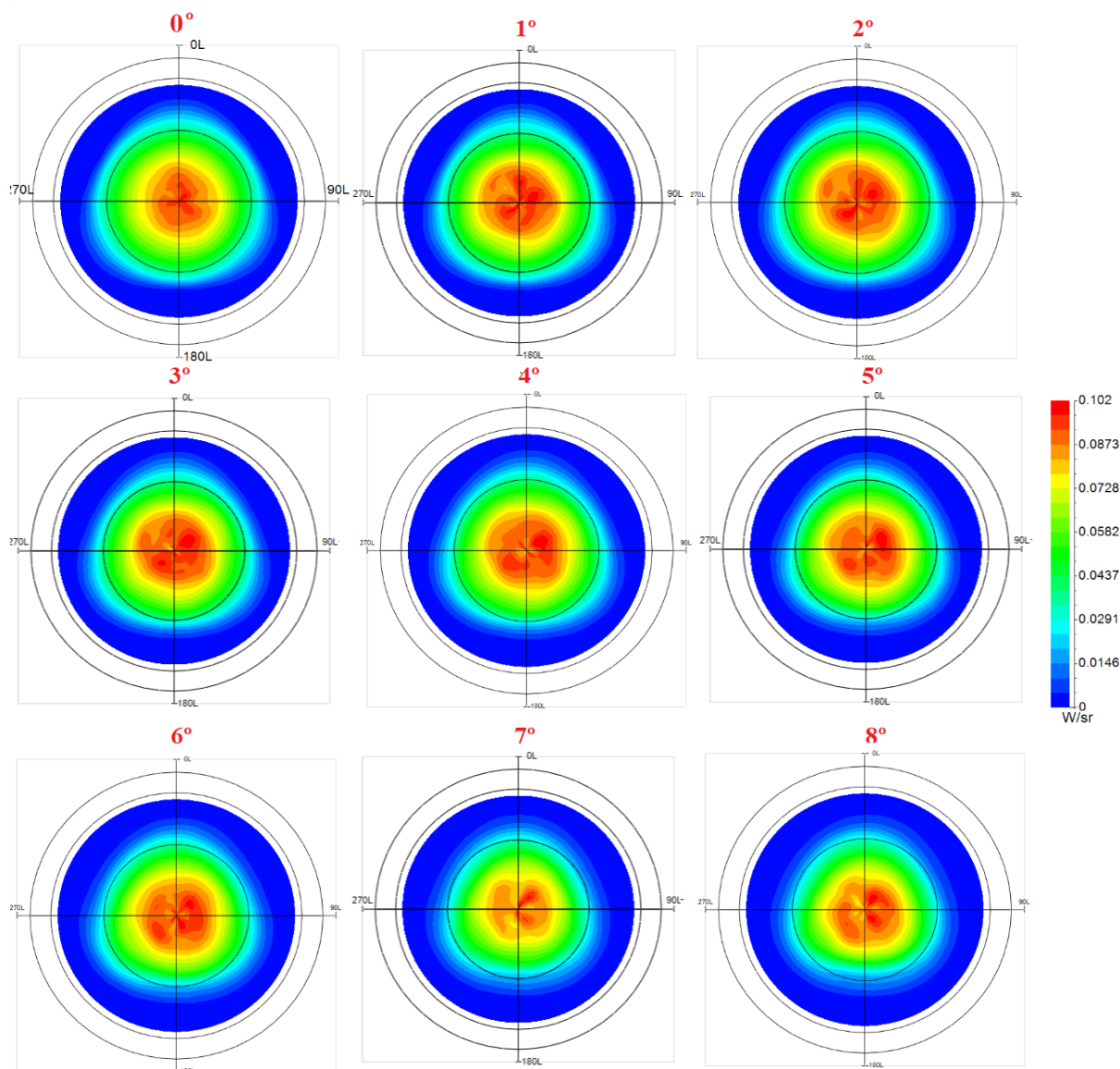
Natočenie vlákien po optimalizácii programom LightTools opäť nie je optimálne po porovnaní s manuálnym nastavením uhlov náklonu vlákien. Najideálnejšie rozloženie intenzity sa javí pri 5° vid' obr. 8.21. Bez natočenia a aj pri 1° a 2° sa nachádzajú malé oblasti s vysokým výkonom v strede prijímača, rozloženie výkonu je len nevýrazne horšie ako v prípade 5° , avšak priľahlé uhly vykazujú podobné rozloženie intenzity, ktoré nemá tak výrazné výkyvy výkonovej úrovne ako je tomu pri priľahlých uhloch konfigurácie s nastavením 5° , teda 3° a 6° . Od 7° sa rozloženie výkonu začína opäť javiť vyrovnanejšie, avšak väčšia časť svetla začína dopadať mimo osminu gule a hlavným zdrojom a majoritným zdrojom svetla dopadajúcim na prijímač sa stáva stredové vlákno a vlákna k nemu najviac priľahlé.



Obrázok 8.21: Simulácie vysielacza z 19 vlákien s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

8.3.7 Simulácie vysielача z 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

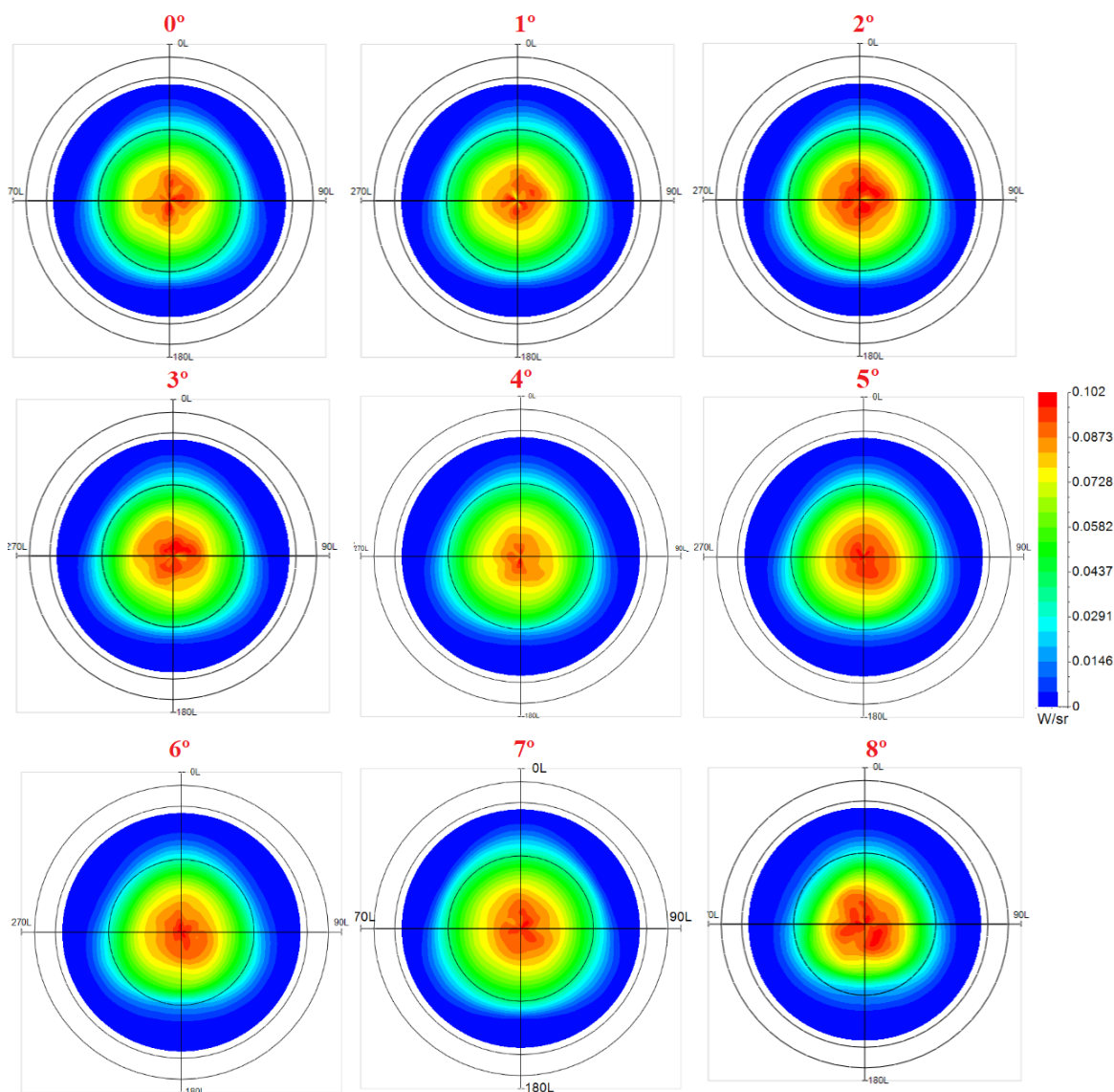
Najideálnejšie rozloženie výkonu nastalo pri 0° vid' obr. 8.22. Pri zakončení vlákien s tvarom polgule sa lúče dokázali rozprestrieť dostatočne aj bez natočenia. Stále sa tu objavujú v strede prijímača oblasti s vyšším výkonom. Rozdiely však nie sú také výrazné. Od druhej najlepšej konfigurácie sa líši približne o 10%. Výkonové špičky pokrývajú síce menšiu oblasť, no aj oblasť so zvyšným výkonom je zmenšená. Nasledujúce rozloženia s najlepšimi výsledkami sú 1° , 2° , 4° a 1° . Oblasť s vysokým rozdielom výkonu na krajoch a v strede prijímacej plochy však tu zaberá približne štvrtinu prijímacej plochy. Veľmi podobné výsledky prináša aj natočenie vlákien o 5° a 6° s rozdielom polohy oblastí s výkyvom výkonu v priestore. Rozdiely medzi jednotlivými konfiguráciami nie sú veľké. Od 7° začína dopadať svetlo mimo prijímaciu plochu.



Obrázok 8.22: Simulácie vysielача z 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1

8.3.8 Simulácie vysieláča z 19 vláken s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

V tomto prípade nastalo najideálnejšie rozloženie výkonu pri 4° vid' obr. 8.23. Pri 6° sú výkonové úrovne stále bez veľkých rozdielov oproti druhej najideálnejšej konfigurácii, ktorá nastala pri 7°. Oblasť uhlov, ktoré majú najlepšie výsledky, ktorá je od 0° do 7° je narušená konfiguráciou s 2° pretože tá má zväčšenú zreteľne väčšiu oblasť s vyšším výkonom oproti ostatným konfiguráciám. Rozloženie výkonu pri 4° sa však približuje rade uhlov od 0° do 1° viac ako rade uhlov od 5° do 7°. Pri 8° je veľmi výrazne zvýšený rozdiel výkonu medzi stredom a okrajom prijímacej plochy, navyše dochádza k vyžarovaniu svetla mimo plochu detektora.



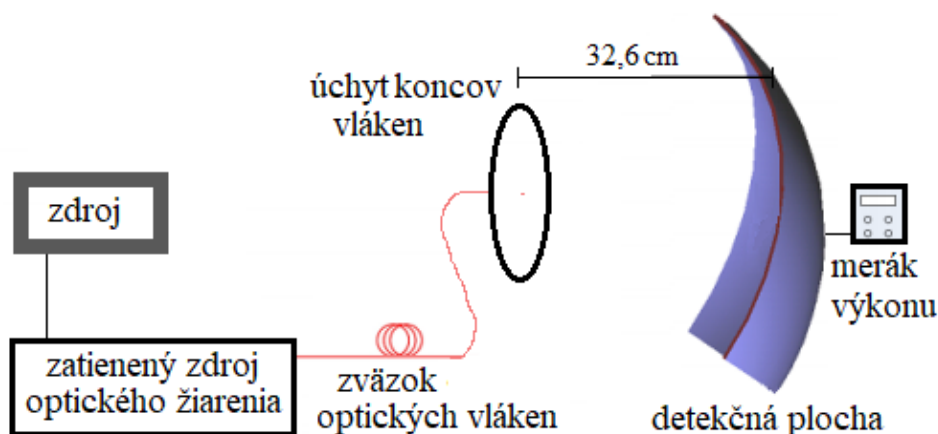
Obrázok 8.23: Simulácie vysieláča z 19 vláken s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

9 Experimentálne meranie optického vláknového vysielача pre VLC aplikácie

Úlohou je najskôr skonštruovať funkčný vláknový vysielач a následne experimentálnym meraním sa pokúšame overiť simulované výsledky optického vláknového vysielача.

9.1 Príprava a postup

Postupne som zostrojoval pracovisko z potrebných komponentov pre vysielanie a prijímanie optického žiarenia podľa pracovnej schémy viď obr. 9.1. Zdrojom je bežný spínavý zdroj s výstupom 5V, ktorým sú napájané LED diódy umiestnené na plošnom spoji s funkciou ďalšieho vyhladenia amplitúdy napätia. Vysielач je kvôli zamedzeniu dopadu optických lúčov nevychádzajúcich z vlákien umiestnený do krabice vybavenej aktívnym chladením. Z tejto krabice vychádzajú optické vlákna, ktorých konce sú zafixované do potrebnej pozície v dierach plastovej dosky umiestnenej 32,6 cm od detekčnej plochy, ktorou je osmina gule pripevnená na statíve STABILA 18194. Použitý merací prístroj výkonu má označenie PM100D s fotodetektorom S120VC od firmy Thorlabs. Fotografia zostaveného pracoviska je v Prílohe A.



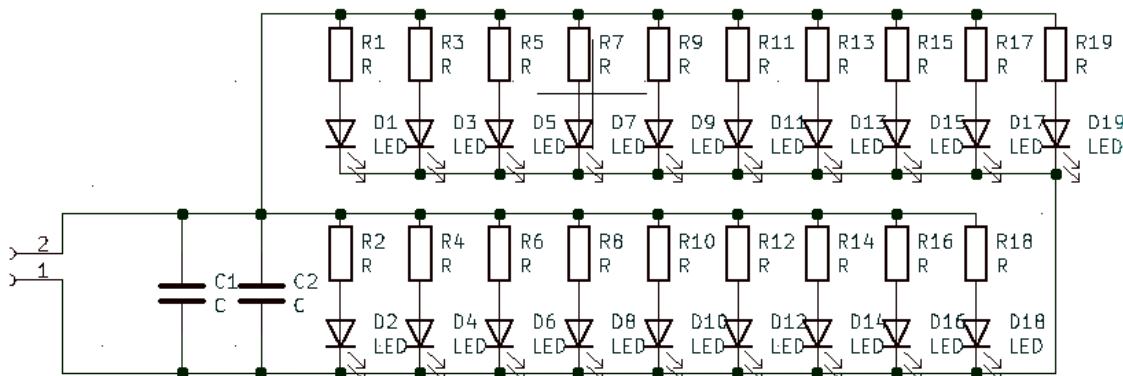
Obrázok 9.1: Schéma pracoviska

9.1.1 Výroba plošného spoja

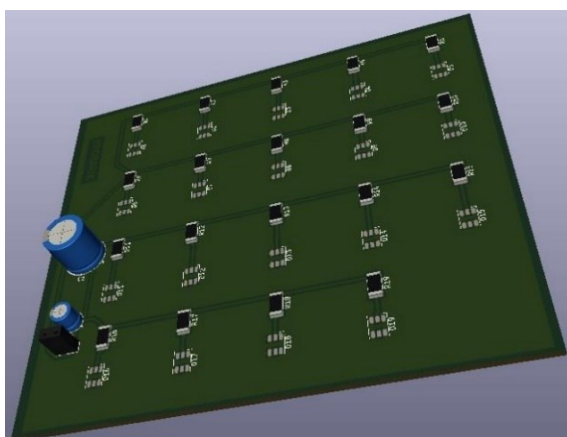
V programe KiCad 5.1.0 som pripravil schému viď obr. 9.2 a navrhol som dosku plošného spoja. 3D pohľad na navrhnutý plošný spoj možno vidieť na obrázku 9.3. *plošný spoj*. Plošný spoj sa vytváral na cuprexitovú dosku fotosenzitívnou metódou, kedy som v programe KiCad vytlačil na priesvitnú fóliu, pričom návrh plošného spoja možno vidieť na obr. 9.4. Fóliu som prilepil na svetlocitlivú stranu dosky, ktorá sa ukrývala pod modrou krycou fóliou. Po osvetlení fotolaku, čo trvalo zhruba 6 minút sa doska ponára do chemikálie, ktorá osvietený fotolak odstráni. Dosku s odstráneným fotolakom vložíme do roztoku oxidu železitého na približne 20 minút. Po tejto dobe je med' na miestach s odstráneným fotolakom vyleptaná. Po očistení vytvorenej dosky plošného spoja sa vyvrtal dierky pre kondenzátory a napájací konektor a následne sa pripájkoval SMD Rezistory R2010, elektrolytický kondenzátor CE 1000u/10VI,

Experimentálne meranie optického vláknového vysielачa pre VLC aplikácie

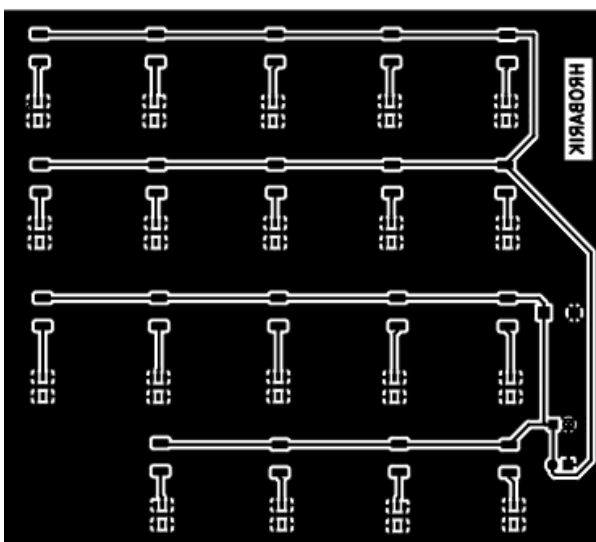
tantalový kondenzátor CT 100n/35V YHC CA42, napájací konektor WEALTHMETAL DS-214B a LED diódy LR G6SP-CBEA-1-1. Zdrojom napätia plošného spoja bol pulzný napájací zdroj s výstupným napätím 5V a 2,4A max.



Obrázok 9.2: Schéma plošného spoja



Obrázok 9.3: 3D vykreslenie plošného spoja



Obrázok 9.4: Osvecovaný návrh plošného spoja

9.1.2 Úprava optických vlákien

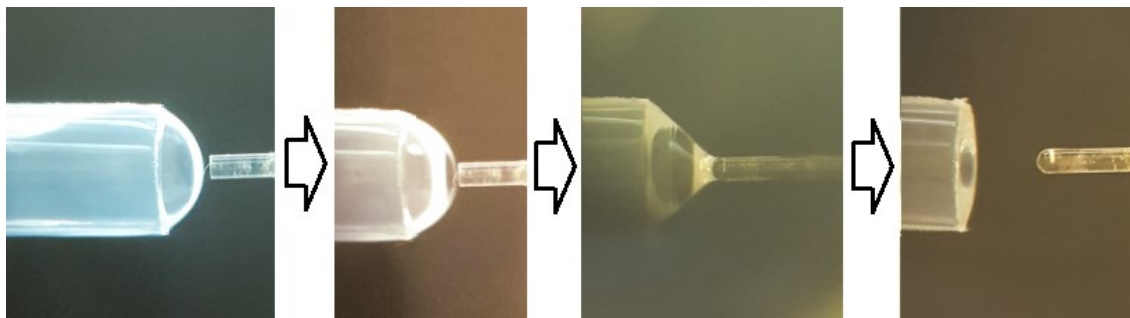
Optické vlákna boli uchytené ku LED diódam a doske plošného spoja pomocou SMA konektorov typu 10610A. Každé vlákno bolo potrebné zabrusiť pomocou brúsnych papierov a kovového prípravku Thorlabs D50-SMA vid' obr. 9.5. Brúsil som postupne na brúsnych papieroch hrúbky 30, 5, 3, 1 a 0,3 μm . Čistotu vlákna som skontroloval mikroskopom Thorlabs FS201. Konce vlákien musia byť zabrusené a vyleštené kvôli správne naviazaniu svetla do vlákien. Nečistoty a ryhy znižujú optický výkon, ktorý môže byť naviazaný do vlákna a nerovnosť čela vlákna má za následok zmenu uhlov šírenia naviazaných lúčov a taktiež zmenu uhlu pe možné naviazanie. Výstupné konce vlákien musia byť tiež zaleštené do kolmice. Každé optické vlákno bolo pomocou dotiahnutia SMA konektoru a meračom intenzity kalibrované tak, aby bol výstupný výkon zhodný.



Obrázok 9.5: Brúsenie a leštenie vlákna

9.1.3 Tvorba zakončení optických vláken

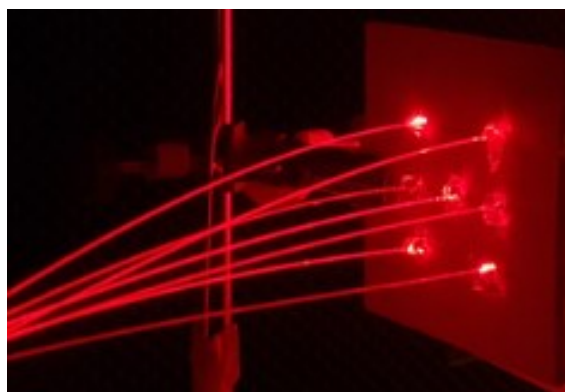
Zmena zakončenia optických vláken predpokladá lepšie pokrytie meranej plochy a vyhladenie výkonových špičiek. Pre úpravu zakončenia optických vláken bol vybratý polydimetylsiloxan.-skrátene PDMS. Často je nazývaný aj silikónový kaučuk. Patrí medzi polymérové organokremičité zlúčeniny, ktoré obsahujú v jednej molekule väzbu Si-O-Si.[43] Jeho pevnosť je pomerne nízka, ale nemení sa pri teplotách od -60°C až do 200°C . PDMS patrí medzi opticky čisté materiály. Jeho priepustnosť predstavuje 96% a materiálová absorpcia 0,04 %.[44] V tejto práci bol použitý silikónový gél, ktorý bol dostupný na katedre s označením Sylgard 184. Jeho index lomu je podľa odvodu pri 600 nm na 1,42 nm. Sylgard 184 je odolný voči mechanickému poškodeniu a radiácii, má vysokú fyzikálnu a elektrickú stabilitu. Pri výrobe PDMS typu Sylgard 184, čo je dvojzložkový zalievací elastomer doplnený o vytvrdzovacie činidlo od firmy Dow Corning podľa návodu firmy v pomere 10:1.[45] Pomocou trepačky s označením Vortex Genius 3 bol silikónový gél s vytvrdzovacím činidlom rozmiešaný a následne uložený do chladničky na dobu 4 dni. Spravilo sa to kvôli zmiznutiu vzduchových bublín, pretože s rastúcou teplotou rozpustnosť kyslíku klesá. Pred začatím nanášania bol Sylgard 184 ponechaný pri izbovej teplote po dobu 2 hodín pre zisk vhodnejšej viskozity. Nasledovalo uchytenie optických vláken pod mikroskop MBT616D, nanosenie PDMS na koniec vlákna prebiehalo dotykom konca vlákna s kvapkou PDMS na konci pipety a následným oddialením. Zakončenie bolo skontrolované pomocou mikroskopu Bresser 58-02520 vid' príloha A. Pre optimálne uchytenie a spojenie s optickým vláknom bolo PDMS na záver zahriate pomocou spájkovačky po dobu 2 minúty a 15 sekúnd. Na obrázku 9.6 je zobrazený pohľad cez mikroskop na nanášanie PDMS na optické vlákno.



Obrázok 9.6: Nanášanie PDMS

9.1.4 Uchytenie vysielacích vlákien

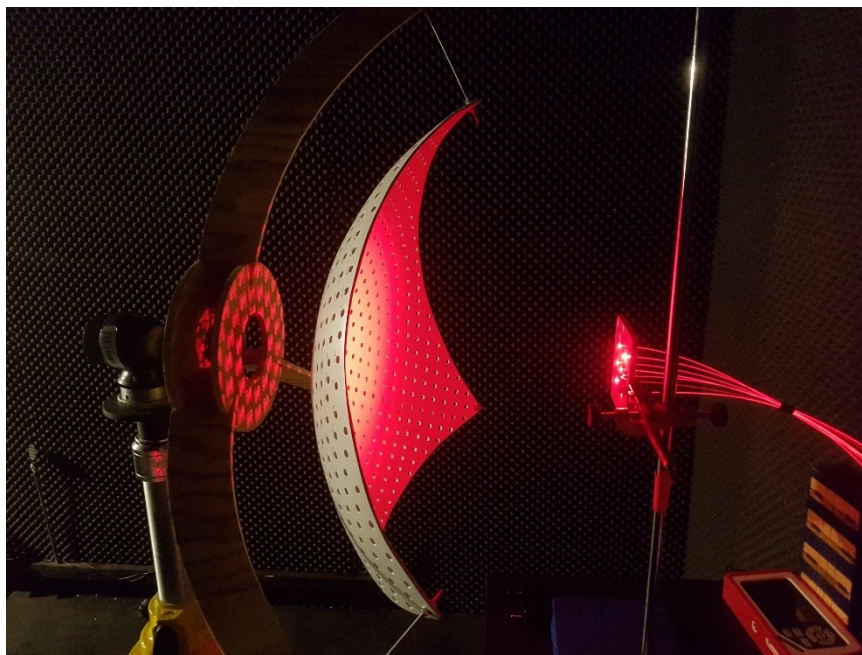
Do plastovej dosky hrubej 4 mm som na vŕtačke s nastaviteľným uhlom vŕtania vyvŕtal diery, do ktorých som následne umiestnil jednotlivé vlákna a zafixoval ich lepidlom. Diery boli rozmiestnené v rovnakých súradniciach ako pri simuláciách. 21 mm vzdialené od stredového vlákna. Pre 7 vlákien to bola konfigurácia dvoch stupňov a pre 19 vlákien som sa rozhodol otestovať 2 aj 4 stupne. V prípade 4 stupňov boli diery vonkajších vlákien vzdialené 42 mm. Na obrázku 9.7 možno vidieť uchytených 7 vlákien s odklonom 2 stupne od stredového vlákna, ktoré je rovno. Tieto konfigurácie som vybral s ohľadom na najlepšie rozloženie intenzity a nemožnosť vytvoriť absolútne zhodný model v reálnych podmienkach.



Obrázok 9.7: Uchytenie 7 vlákien

9.1.5 Prijímač

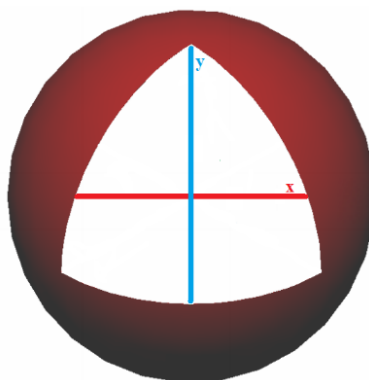
Guľová Plocha slúži na dodržanie vzdialeností dráh medzi zdrojom a prijímačom. Umožňuje to dodržať hodnotu 3 dB, čo predstavuje 50% výkonu pri kolísaní hustoty optického výkonu pri detekcii. Osmina gule bola zvolená kvôli teoretickému umiestneniu vysielča v rohu miestnosti. Tento model vychádzal z gule, ktorá mala obvod 205 cm a polomer 32,62 cm. Na výrobu bol použitý sklolaminát, do ktorého boli vyvŕtané diery priemeru 0,5cm v kružniciach vzdialených 2 cm od seba. Spolu je na celej ploche osminy gule 507 meracích bodov. Guľová plocha slúži na dodržanie rovnakých dráh a vzdialeností medzi vysieláčom a prijímačom. Vzdialenosť prijímača a vysielča bola nastavená, rovnako ako pri simulácii, na 32,6 cm. Na obrázku 9.8 možno vidieť danú osminu gule osvecovanú vláknami uchytenými do plastovej dosky v ktorej boli podľa uhlu vyvŕtané diery.[4]



Obrázok 9.8: Prijímacia plocha

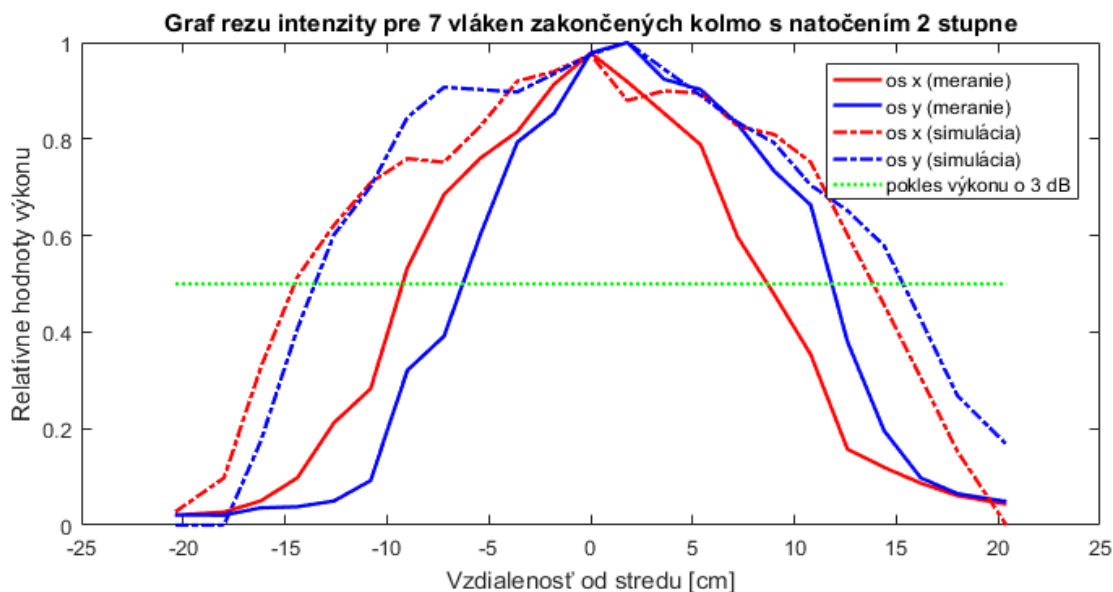
9.1.6 Výsledky meraní a ich porovnanie s výsledkami simulácií

Meranie výkonovej úrovne prebiehalo v temnej miestnosti rozmerov $2,6 \times 3 \times 2,5$ metrov, kvôli zamedzeniu prístupu parazitného svetla. Vďaka výsledkom simulácii som zvolil experimentálne meranie konfigurácii 2 stupne pre 7 vlákien aj 19. Pre 19 vlákien ešte navyše aj 4 stupne. LED diódy boli zvolené typu LR. Pred začatím merania som kalibroval merací prístroj výkonu PM100D s fotodetektorom S120VC od firmy Thorlabs na vlnovú dĺžku, ktorá je najdominantnejšia pre LED diódu typu LR, čo predstavuje 625 nm. Následne som meral 507 pozícií na osmine gule. Okrem toho som porovnal aj čiarové grafy. Hodnoty pre čiarové grafy boli zostavené z hodnôt ležiacich na osi x a y vid' obr. 9.9.



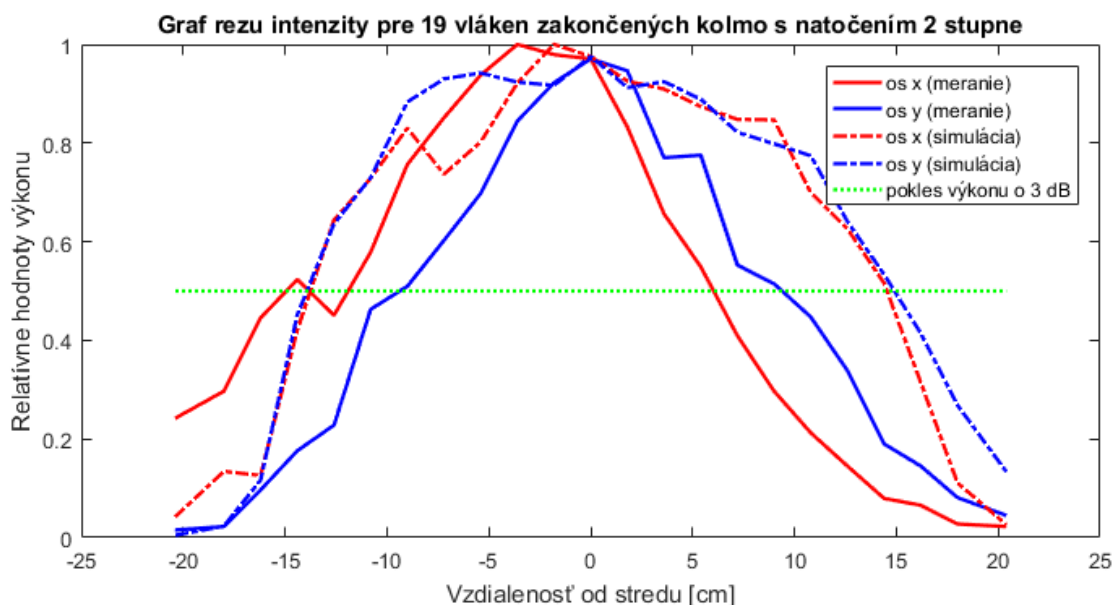
Obrázok 9.9: Osi detekčnej plochy

9.1.7 Porovnanie výsledkov simulácií a experimentálneho merania LR LED



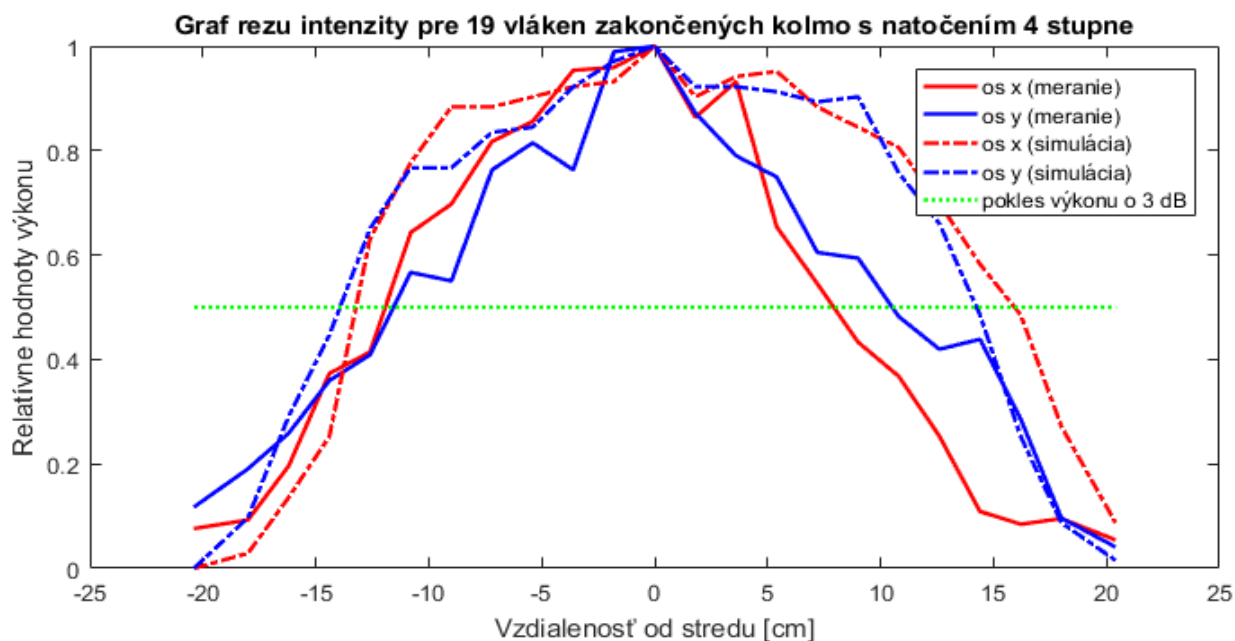
Obrázok 9.10: Porovnanie výsledkov pre 7 vláken s náklonom 2 stupne

Z grafu rezu intenzity pre 7 vláken zakončených kolmo možno pozorovať podobnosť kriviek výsledkov simulácii i merania. Výsledky merania preukazujú zhoršené pokrytie okrajov detekčnej plochy. Ostatné rozloženie výkonu nepreukazuje vzájomne výrazné zmeny.



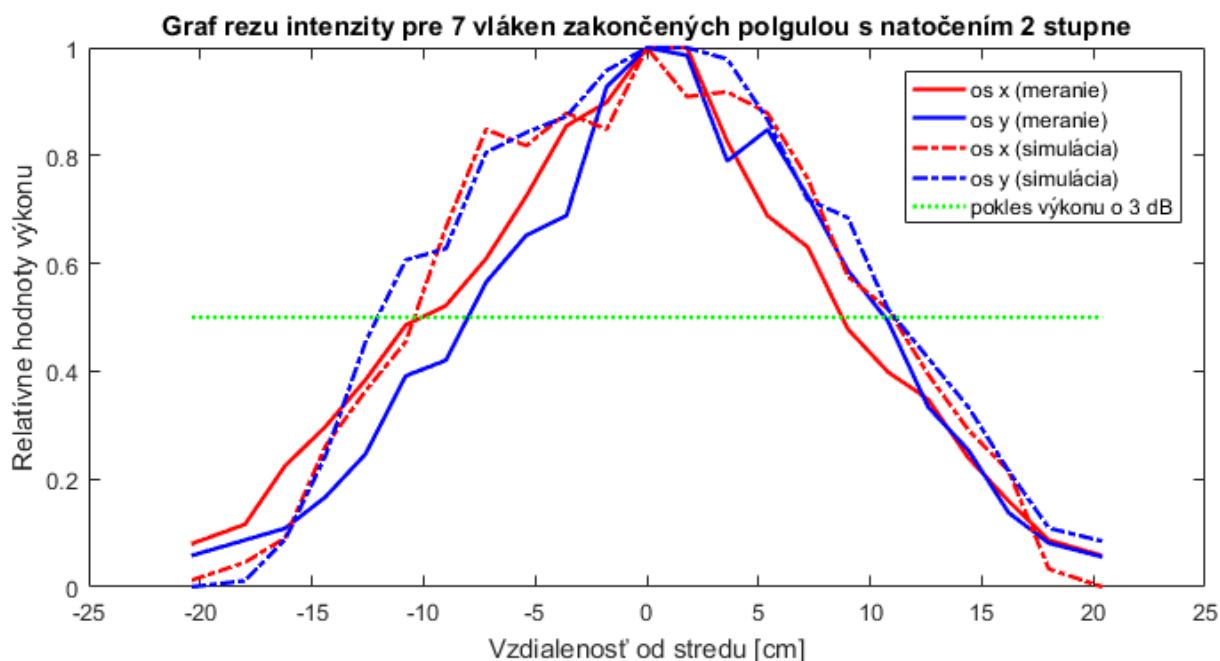
Obrázok 9.11: Porovnanie výsledkov pre 19 vláken s náklonom 2 stupne

Na grafe rezu intenzity pre 19 vláken s natočením 2 stupne a kolmým zakončením možno pozorovať, že výsledky merania preukazujú zhoršené pokrytie okrajov detekčnej plochy a vyšší výkon detegovaný v centrálnej časti vysielача, pokiaľ v simuláciách je centrálna a prostredná časť vysielача pokrytá pomerne rovnomerne.



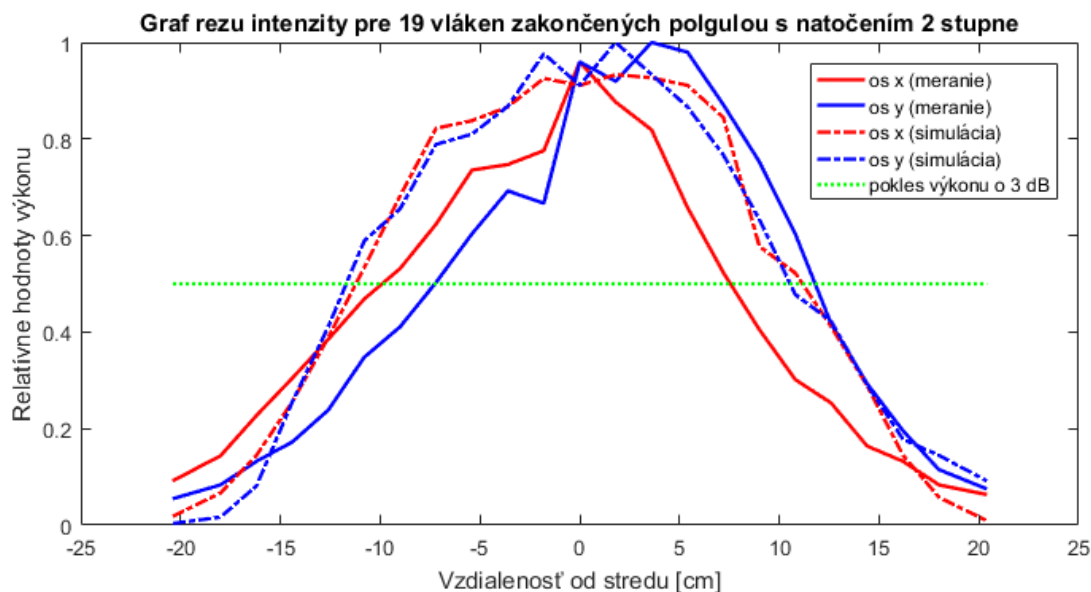
Obrázok 9.12: Porovnanie výsledkov pre 19 vláken s náklonom 4 stupne

Pri reze intenzity pre 19 vláken s natočením 4 stupne a kolmým zakončením možno pozorovať, že výsledky merania preukazujú podobné pokrytie okrajov detekčnej plochy a vyššie výkonové rozdiely detegované v centrálnej časti vysielacza. V simuláciách som pozoroval, že prijímač bol pokrytý rovnomernejšie.



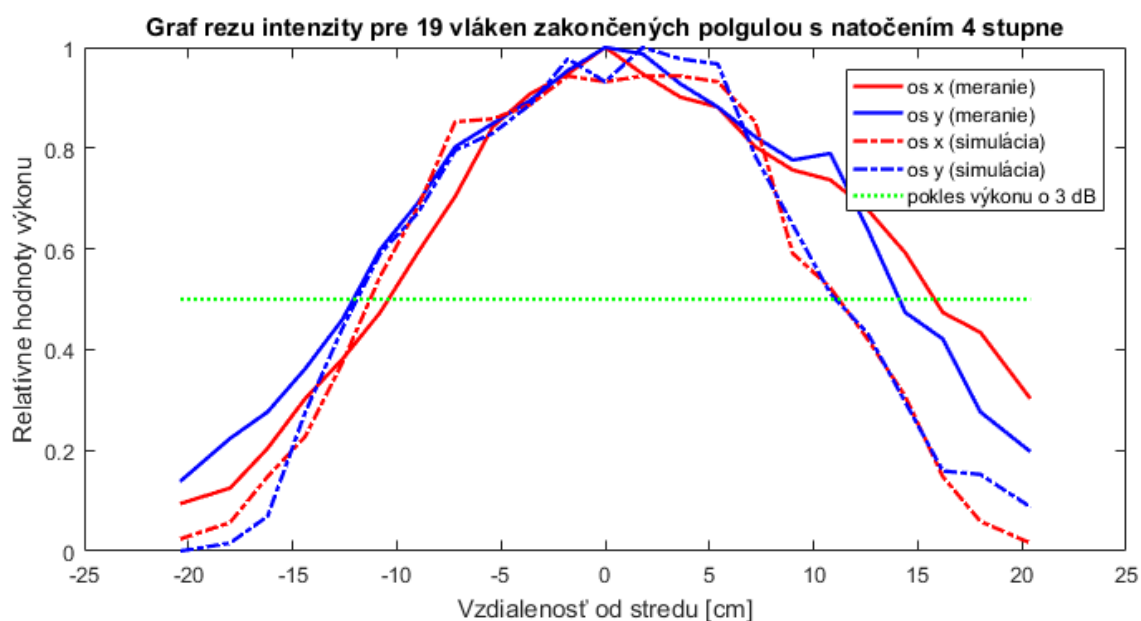
Obrázok 9.13: Porovnanie výsledkov pre 7 vláken s náklonom 2 stupne, zakončením polgulou

V prípade rezu intenzity pre 7 vláken zakončených polgulou možno pozorovať vysokú podobnosť kriviek výsledkov simulácii i merania. Výsledky merania nepreukazujú zhoršené pokrytie okrajov detekčnej plochy. Rovnomernosť výkonu je však v prípade simulácií väčšia.



Obrázok 9.14: Porovnanie výsledkov pre 19 vláken s náklonom 2 stupne, zakončením polgulou

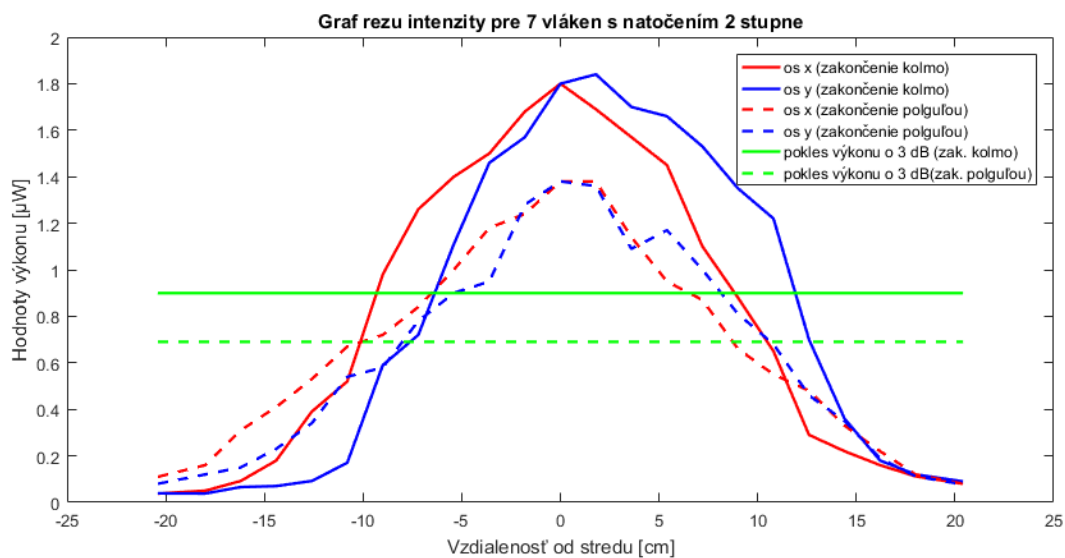
V prípade rezu intenzity pre 19 vláken zakončených polgulou a náklonom 2 stupne možno pozorovať väčšie výkonové špičky v prípade reálneho merania ako v prípade simulácií. Rozloženie výkonu preukazuje v prípade simulácií lepšie výsledky.



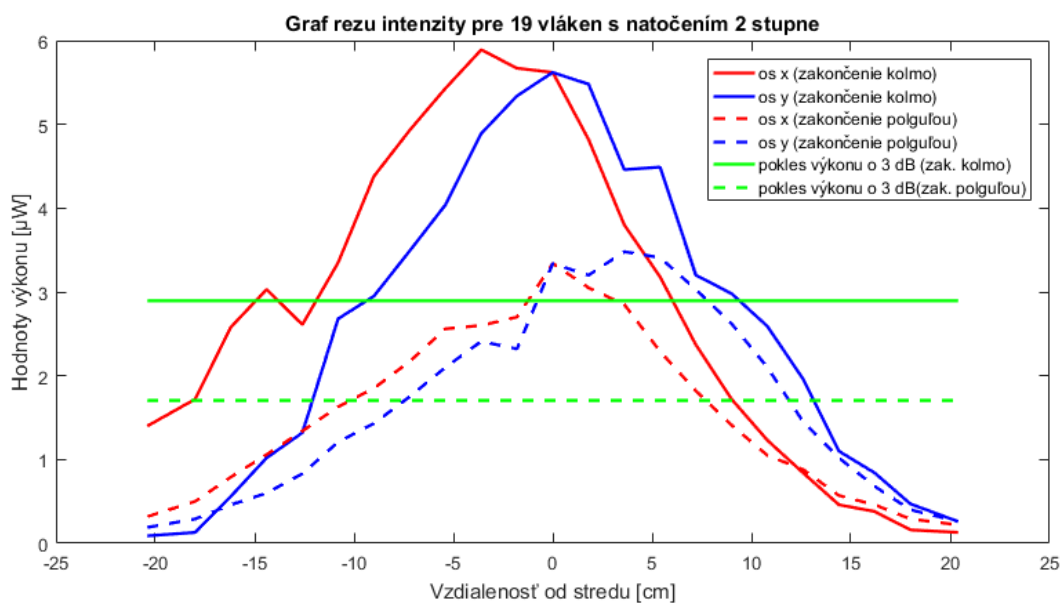
Obrázok 9.15: Porovnanie výsledkov pre 19 vláken s náklonom 4 stupne, zakončením polgulou

Graf rezu intenzity 19 vláken zakončených polgulou a naklonením 4 stupne vykazuje vysokú podobnosť výsledkov simulácií i merania. Experimentálne meranie dokonca vykazuje lepšie rozloženie výkonu. Než tomu je v prípade simulácie.

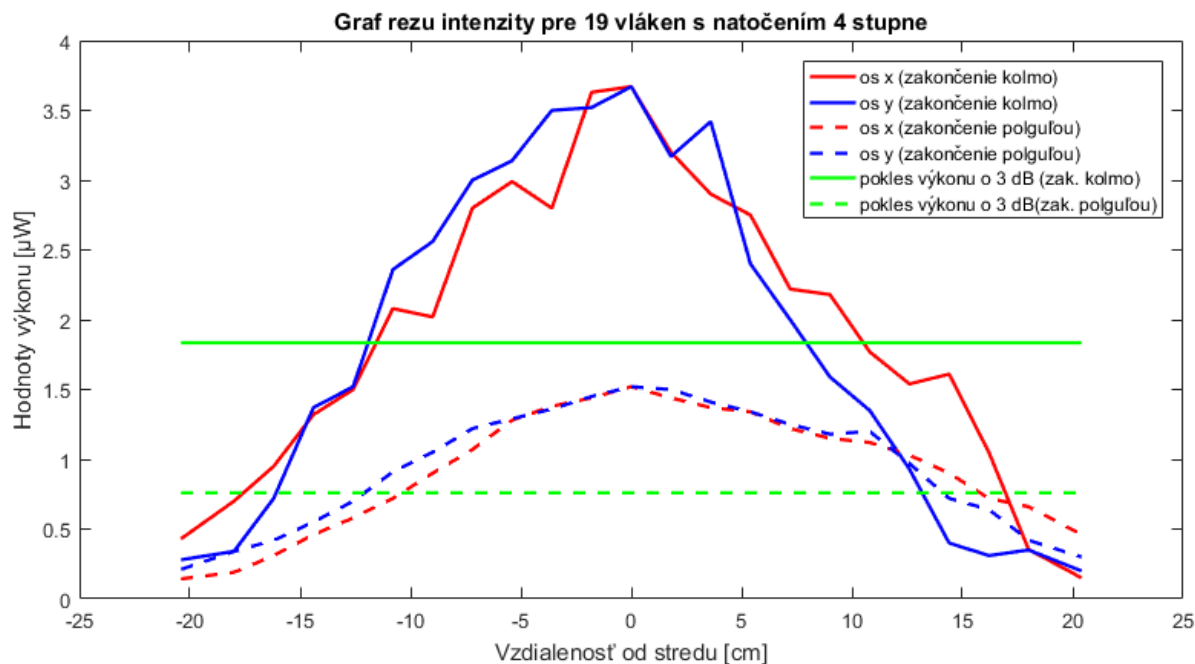
9.1.8 Porovnanie rozloženia výkonu pre kolmé a polguľové zakončenie



Obrázok 9.16: Graf rezu intenzity 7 vláken s náklonom 2 stupne



Obrázok 9.17: Graf rezu intenzity 19 vláken s náklonom 2 stupne



Obrázok 9.18: Graf rezu intenzity 19 vlákien s náklonom 4 stupne

Z porovnania kriviek meraných hodnôt výkonu pri zakončení optických vlákien kolmo a zakončených polgulou možno vyvodiť, že rozloženie výkonu je v prípade zakončenia polgulou lepšie. Tento rozdiel sa najviac prejavil pri 19 vláknach s náklonom 4 stupne. Výkonové maximá boli vplyvom zakončenia tvoreného PDMS a tvaru polgule viac rozptýlené.

Záver

V rámci diplomovej práce som zhrnul podstatné poznatky týkajúce sa prenosu svetla, optických bezvláknových sietí, svetelných veličín, účinkov svetla na zdravie človeka a činiteľov vplyvujúcich na prenos svetla či už v prostredí vlákna alebo mimo neho. Simuloval som rôzne konfigurácie optického vláknového vysielača a následne som ich overil v experimentálnom meraní.

Zo simulácií rôznych konfigurácií optického vláknového vysielača s ohľadom na zakončenia optických vlákien v programe LightTools možno zhrnúť tieto poznatky:

V prípade vysielača tvoreného siedmimi vláknami s kolmým zakončením vlákien nehrá typ LED diódy významnú úlohu pri výsledkoch. Je však možné pozorovať, že rozdiel vlnových dĺžok má vplyv na vyviazenie svetla z vlákien a na rozloženie výkonu na prijímači. Pre diódu LR bola vyžarujúca vlnová dĺžka v rozsahu 620 nm až 629 nm s centrálnou vlnovou dĺžkou 625 nm a pre diódu LA bola vlnová dĺžka vyžarujúceho svetla v rozmedzí 612 nm až 624 nm s centrálnou vlnovou dĺžkou 617 nm. Pri výraznejšom rozdiely vlnových dĺžok by tomu mohlo byť inak. Pre kolmé zakončenie optických vlákien vyšli výsledky analýzy najlepšie pre konfiguráciu s natočením od jedného do troch stupňov. V prípade, že bolo týchto 7 vlákien zakončených polguľou, nastalo najlepšie rozloženie výkonu pri konfiguráciách od 0 do 4 stupňov. Pri porovnaní typov LED diód je možné pozorovať, že rozdiel vyžarovaných vlnových dĺžok má vplyv na rozloženie výkonu na prijímacej ploche, nie je však výrazný. Pri zakončení vlákien s polguľou vytvorenou z PDMS pozorujeme zlepšenie rozloženia intenzity oproti kolmému zakončeniu najmä v konfigurácii od 0 do 4 stupňov. Na základe týchto výsledkov som preto zvolil overovanie LR LED a konfiguráciu dva stupne ako východiskovú pre overenie výsledkov pri experimentálnom meraní vysielača tvoreného 7 vláknami.

Pri konfiguráciách vysielača s 19 vláknami a ich kolmým zakončením boli výsledky porovnateľné s vysielačom tvoreným 7 vláknami. Nenastalo rovnomernejšie rozloženie výkonu na prijímači, zväčšila sa však oblasť s vysokým výkonom takmer dvojnásobne, čo je pozitívne a pravdepodobné. Rozdiel rozložení výkonu medzi typmi LED diód bol opäť minoritný. Rada uhlov s najlepšimi výsledkami sa rozšírila na 0 až 6 stupňov. Konfigurácie tejto rady vykazujú vyššiu výsledkovú podobnosť ako tomu bolo pri siedmich vláknach. Pri detailnej analýze však môžeme tiež vybrať 2 stupne ako konfiguráciu s najmenšími výkyvmi rozloženia výkonu. V prípade zakončenia týchto 19 vlákien polguľou, nastáva výraznejší rozdiel medzi použitím typom LED diódy aj medzi porovnaním s vysielačom tvoreným 7 vláknami. V prípade použitia LED typu LA sa javí ako najlepšia konfigurácia natočenia vlákien dva stupne. Pri natočeniach vlákien nastáva vysoký rozdiel výkonu medzi centrálnou oblasťou a okrajom prijímača. V prípade použitia LR LED sú najlepšie výsledky pri natočení 4 stupne. V ostatných prípadoch je výkon sústredovaný v centrálnej oblasti, avšak menej výrazne ako pri LA LED. Pri porovnaní zakončenia vlákien je polguľové zakončenie vhodnejšie ako kolmé najmä bez natočenia ale aj pri natočení po 4 stupne. Optimalizácia programom LightTools po porovnaní s manuálnym nastavením uhlov náklonu vlákien nebola optimálna.

V experimentálnej časti som overoval simulované výsledky pre 7 vláken s náklonom 2 stupne a pre 19 vláken 2 stupne aj 4 stupne. Kolísanie intenzity do 3 dB nenastalo na celej ploche prijímača. Pod 3 dB klesali hodnoty na okrajoch prijímača, najviac v rohoch prijímača. Výsledky simulácií a nameraných dát preukázali že simulovaný vysielač je realizovateľný. Výsledky sa však nezhodovali, rozdielom je horšie pokrytie krajov vysielača a výkonové maximum viac sústredené v strede vysielača. Rozdiely však nie sú také značné, aby vyvrátili výsledky simulácie, ale skôr ich potvrdili. Vysvetlení pre nezuhu výsledkov simulovaných dát môže byť mnoho. V prvom rade je potrebné si uvedomiť, že virtuálne prostredie sa podobá ideálnym podmienkam. Aj keď som sa snažil čo najviac napodobniť virtuálny model, nebolo možné všetko spraviť s absolútnou presnosťou. Rozdiely preto môžu byť zapríčinené nedokonalosťou optického vlákna, prachom, ktorý mohol sadnúť na koniec vlákna alebo prijímač a nemal by som opomenúť ani možnú chybu ľudského faktoru pri meraní a zhotovovaní optického vysielača a ďalších komponentov. Potvrdilo sa však to, čo som vyvodil z výsledkov simulácií. Polguľové zakončenie vláken má pozitívny efekt na rozloženie intenzity a so zvyšujúcim sa počtom vláken sa zlepšuje možnosť pokrytia prijímacej plochy.

Predpokladám, že táto diplomová práca bude mať prínos pre ďalší vývoj bezvláknových optických sietí tvorených vláknovým optickým vysielačom, prípadne pre rozvoj osvetľovania optickým vláknom. Z tejto práce je možné čerpať informácie nápomocné pre možné ďalšie simulovania a testovania rôznych typov LED, optických vláken a ich zakončení. Taktiež možno zistené fakty porovnať s ďalšími prácami zaoberajúcimi sa touto problematikou alebo ich priamo využiť pri konštrukcii vláknových vysielačov a voľbe ich zakončení.

Použitá literatura

- [1] ŠISKA Petr. *Optoelektronika*. Skripta. Vysoká Škola Báňská- Technická Univerzita Ostrava.
- [2] GEHRING M. Georg, SCHWEINSBERG Aaron, BARSİ Christophe, KOSTINSKI Natalie, BOYD W. Robert. *Observation of Backward Pulse Propagation Through a Medium with a Negative Group Velocity*. American Association for the Advancement of Science. 2006. ISSN 0036-8075.
- [3] FAJKUS Marcel, LÍNER Andrej. *Optické komunikace I*. Skripta. Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava. Ostrava. 2013. nev.
- [4] LÁTAL, Jan. *Studium vlivu zakončení optických vláken na distribuci světla v prostoru pro vláknové segmentové vysílače*. Dizertační práce. Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava. Ostrava. 2015. nev.
- [5] VRBOVÁ, M. *Úvod do laserové techniky*. Praha, 1998. ISBN 80-010-1108-9.
- [6] *Elektronická učebnice optokomunikačné systémy*. [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://evyucba.ku.sk/oks/html/3.html>.
- [7] HAVELKA, Bedřich. *Geometrická optika* Československá akademie věd. Praha. 1955. I.díl
- [8] ŠISKA Petr. *Nekomunikační Aplikace Optických Vláken*. Skripta. Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava.
- [9] PÁPEŠ Martin, JAROŠ Jakub. *Optické komunikace II*. Skripta. Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava. nev.
- [10] MARKO Ján. *Konstrukcia Ramanových spektrometrov*. Bakalárska práca. Univerzita Tomáše Bati va Zlíne. 2013.
- [11] CHAVÍK, Jan. *Měření optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech*. Ostrava, 2016, Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.
- [12] ŽIDEK Daniel. *Simulace vlivů disperzních jevů v optických sítích*. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2015.
- [13] VALÁŠEL Martin. *Lineární a nelineární jevy v optických přístupových sítích*. Bakalárska práca. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. 2014.
- [14] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2003. ISBN 80-214-1833-8.
- [15] HROMULÁK, Daniel. *Model optického vysílače založený na optických vláknech pro vnitřní bezvláknové sítě*. Ostrava, 2016, Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.

- [16] VITÁSEK Jan. *Optické atmosférické komunikace. Skripta*. Vysoká Škola Báňská- Technická Univerzita Ostrava. 2014.
- [17] WILIAMS R David. *Earth Fact Sheet* [online]. Posledná revízia 2017-03-16 [cit. 2019-02-24]. <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>>.
- [18] Deva K Borah, Anthony C Boucouvalas, Christopher C Davis, Steve Hranilovic, Konstantinos Yiannopoulous. *A review of communication-oriented optical wireless systems*. Borah et al. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012.
- [19] Madhusudhana Reddz Lebaka. *Optimization of spot pattern in indoor diffused optical wireless systems*. Kanpur, Indian Institute of technology, Červen 2006, 59 stran, Kanpur-208016.
- [20] HANACEK, F., J. LATAL, P. SISKÁ, V. VASINEK, P. KOUDELKA, J. SKAPA a J. HURTA. *Fiber optic sensor for high temperatures*. In: International Conference on Applied Electronics (AE 2010). Plzeň: IEEE, 2010, s. 1–4. ISBN 978-80-7043-865-7.
- [21] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení precovních prostorů*. Praha: Český normalizační institut. 2014.
- [22] KORČEK, Tomáš. *Vytvoření simulace optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech*. Ostrava, 2014, Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Látal, Jan.
- [23] IEEE 802.15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011.
- [24] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje. Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2009. ISSN issn1212-0812.
- [25] FUKA Josef, HAVELKA Bedřich. *Optika a atomová fyzika*. Učebnice pro vysoké školy Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [26] REICHL Jaroslav, VŠETIČKA Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. Posledná revízia 2011-05-11 [cit. 2019-02-24]. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/471-zobrazovani-optickymi-soustavami>.
- [27] SIVABALAN, Arumugam a Joseph JOHN. *Improved power distribution in difuse Indoor Optical Wireless systems employing multiple transmitter configurations*. Optical and Quantum Electronics. 2006-10-30,roč. 38, č.8, s.711-725. ISSN 0306-8919.
- [28] GREENWOOD, N a A. EARNSHAW. *Chemie prvků*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-854-2738-9.
- [29] SMYTH, P.P., D. WOOD, S. RITCHIE a S. CASSIDY. *Optical wireless: New enabling transmitter technologies*. In: Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications. Geneva: IEEE, 1993, s. 562–566. ISBN 0-7803-0950-2. DOI: 10.1109/ICC.1993.397327.

- [30] BÖTTGER Gunnar, QUEISSER Marco, JÜLG Peter, SCHRÖDER Henning. *OIT - Optical Interconnection Technolog. Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration IZM*. Berlin. 2014.
- [31] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. *Gigabit optical wireless communication system for indoor applications*. In: Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia. Shanghai: IEEE, 2010, 453 - 454. ISBN 978-1-4244-7111-9.
- [32] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. *High-Speed Optical Wireless Communication System for Indoor Applications*. IEEE Photonics Technology Letters. 2011, roč. 23, č. 8, s. 519-521. ISSN 1041-1135.
- [33] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. *4x12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications*. Journal of Lightwave Technology. 2011, roč. 29, č. 13, s. 1988-1996. ISSN 0733-8724.
- [34] OFS Catalog [online]. [cit. 2019-02-25]. <<https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/item/all-silica-optical-fiber/high-oh-0-22-na-optical-fiber/cf01493-43>>.
- [35] *Riziká RF žiarenia* [online]. Posledná revízia 2016-11-19 [cit. 2019-02-24]. <<http://elektrosmog.voxo.eu/rizika-ziarenia>>.
- [36] ČSN EN 60825-1. *Bezpečnost laserových zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [37] *Bezpečnost laseru Třídy 1 až 4* [online]. [cit. 2019-02-24]. <<http://www.mylt.sk/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>>.
- [38] VENDLEK Marek. *Využitie laserov v strojárskych technológiach*. Diplomová práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave. 2010.
- [39] *Nariadení vlády č. 291/2015 Sb* [online]. [cit. 2019-02-24] Dostupné z: <<https://zakonyprolidi.cz/cs/2015-291#p6>>.
- [40] Úrad pre vydávanie publikácií Európskej únie. *Nezáväzná príručka osvedčených postupov na vykonávanie smernice 2006/25/ES*. Luxemburg: Úrad pre vydávanie publikácií Európskej únie. ISBN 978-92-79-19819-9 doi:10.2767/31514.
- [41] *LightTools vlastnosti* [online]. [cit. 2019-02-24]. <<https://www.synopsys.com/optical-solutions/lighttools/feature-details.html>>.
- [42] *LightTools moduly* [online]. [cit. 2019-02-24]. <<https://www.synopsys.com/optical-solutions/lighttools/modules.html>>.
- [43] SCHEJBALOVÁ, H., I. STIBOR, I. PROKOPOVÁ a D. LUKÁŠ. *Polymerizace cyklických sloučenin (monomerů)*. VIII.6.2.4.
- [44] ROUS, B. *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1991, 463 s. ISBN 80-030-0617-1.

[45] Dow Corning. *SYLGARD™ 184 Silicone Elastomer* [online]. Technical data sheet. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <<https://consumer.dow.com/en-us/document-viewer.html?randomVar=9187565239623041817&docPath=/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/11/11-31/11-3184-sylgard-184-elastomer.pdf>>.

Zoznam príloh

Príloha A: Fotografie z merania.....	- II -
Príloha B: Grafy rezu intenzity.....	- VI -
Príloha C: Dáta programu LightTools, KiCad a namerané dáta.....	- na CD -

Súčasťou DP je CD.

Adresárová štruktúra priloženého CD:

"DVD-ROM":\KiCad\

"DVD-ROM":\Namerané hodnoty\

"DVD-ROM":\Simulácie LightTools\

Príloha A: Fotografie z merania



Obrázok A.1: Vŕtanie drážok pre uchytenie vlákien



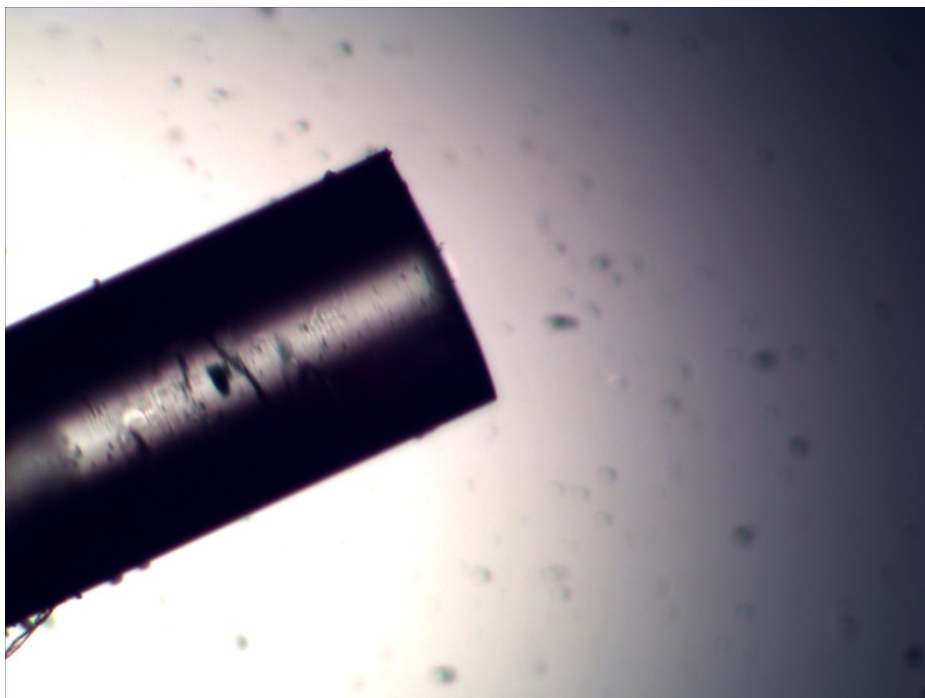
Obrázok A.2: Pracovisko nanášania PDMS



Obrázok A.3: Prvok na chytenie SMA konektoru ku LED



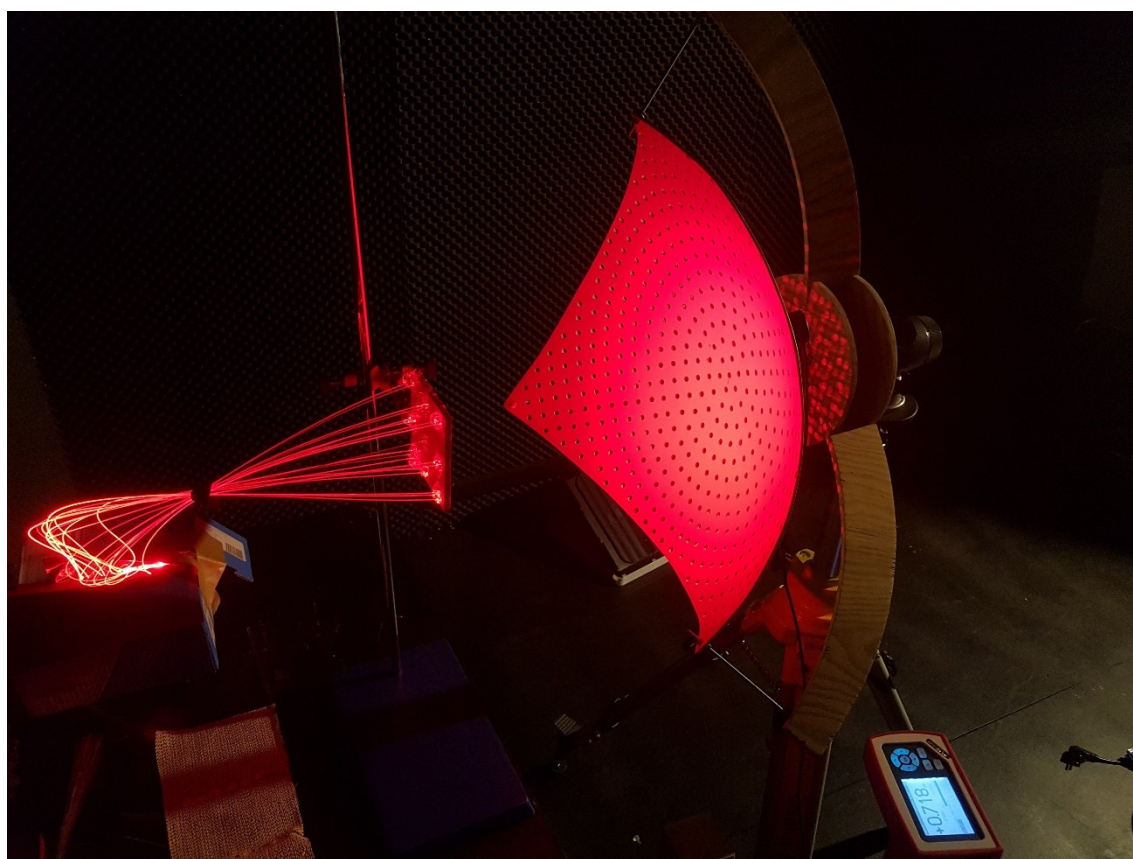
Obrázok A.4: Plošný spoj s pripojenými vláknami



Obrázok A.5: Pohľad cez mikroskop na zakončenie vlákna

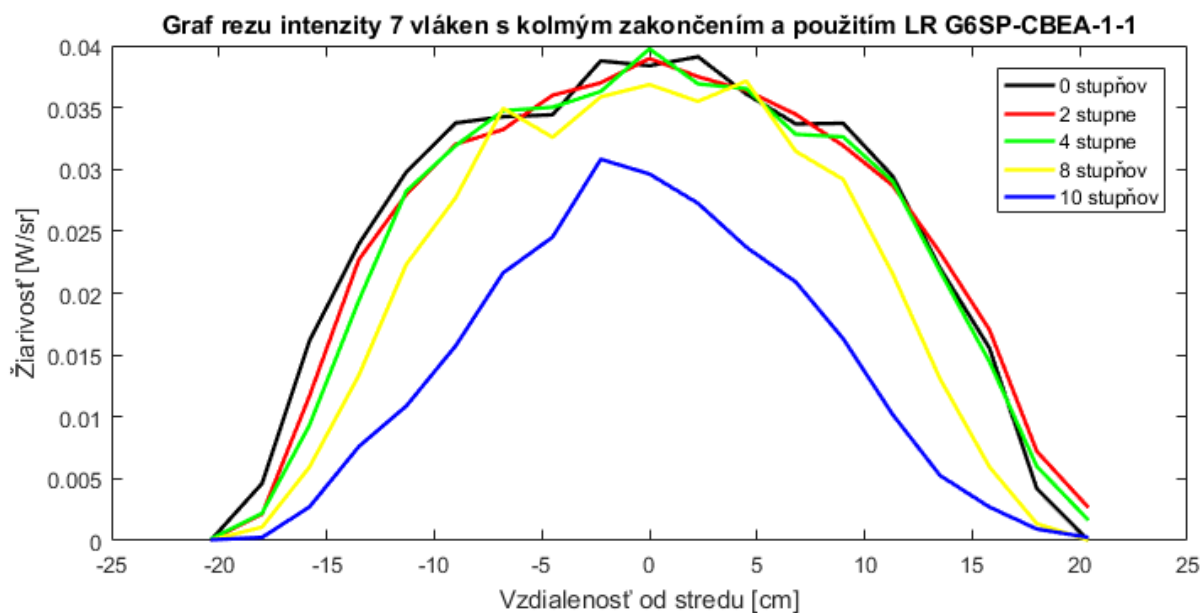
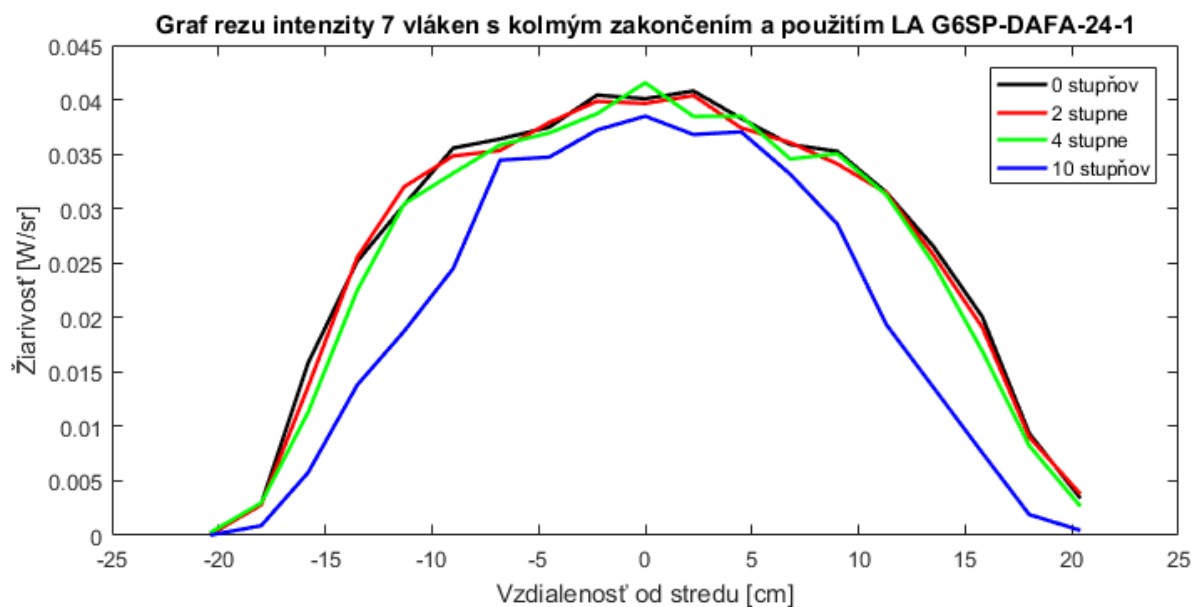


Obrázok A.6: Pohľad cez mikroskop na zakončenie vlákna s PDMS

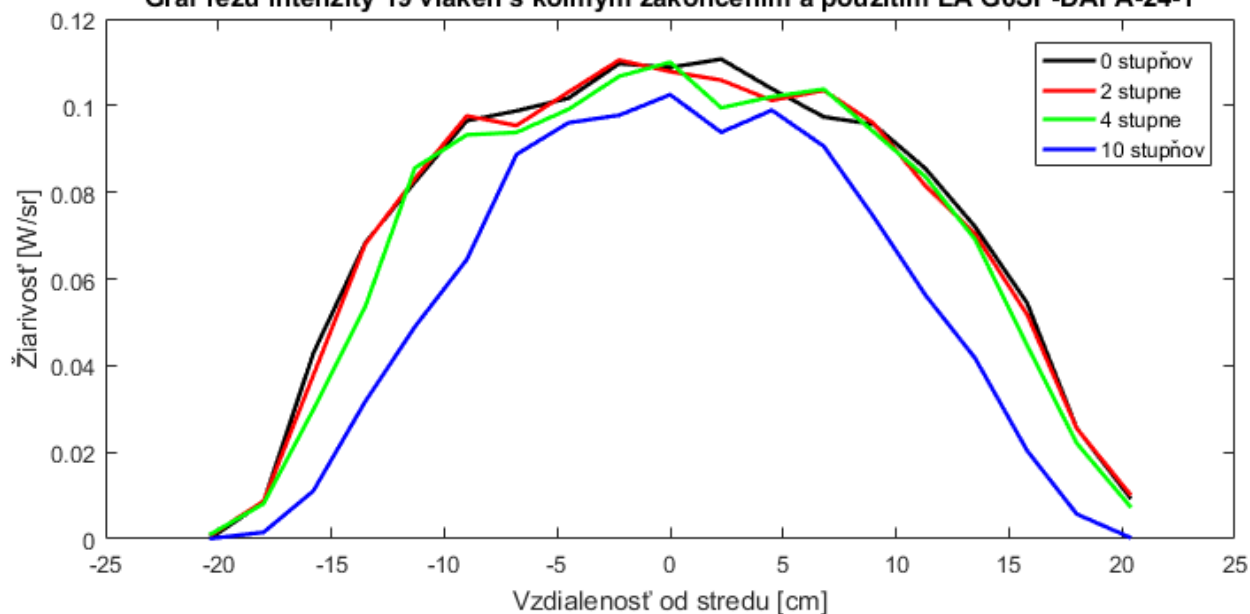


Obrázok A.7: Zostavené pracovisko

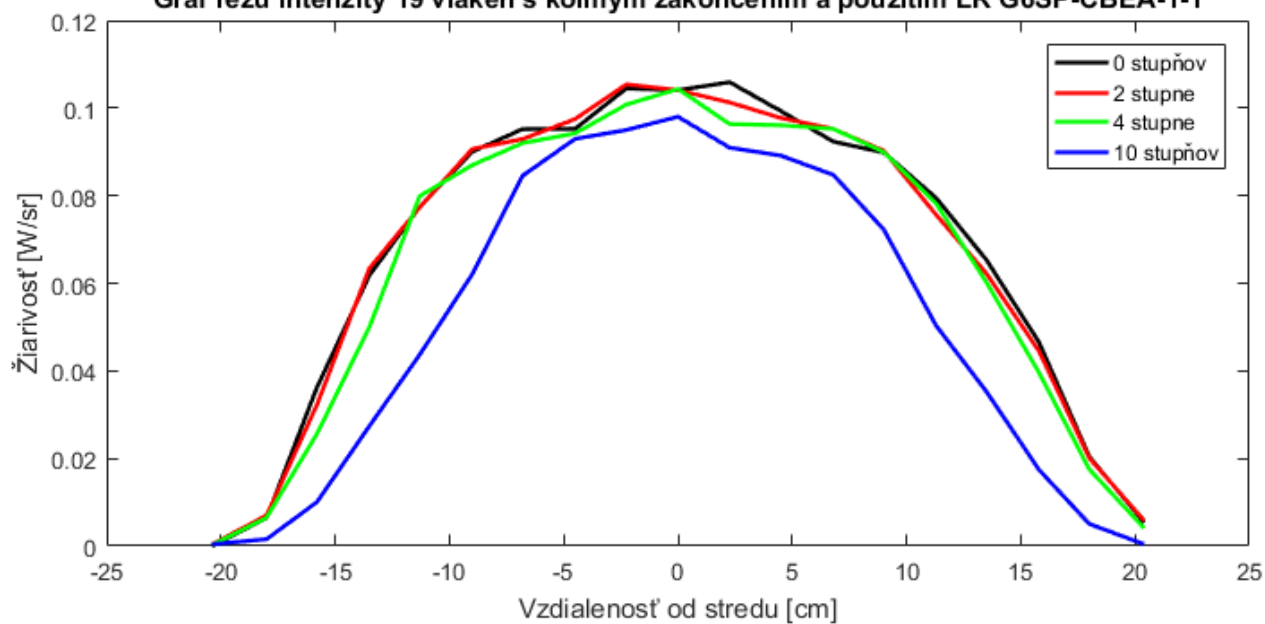
Príloha B: Grafy rezu intenzity



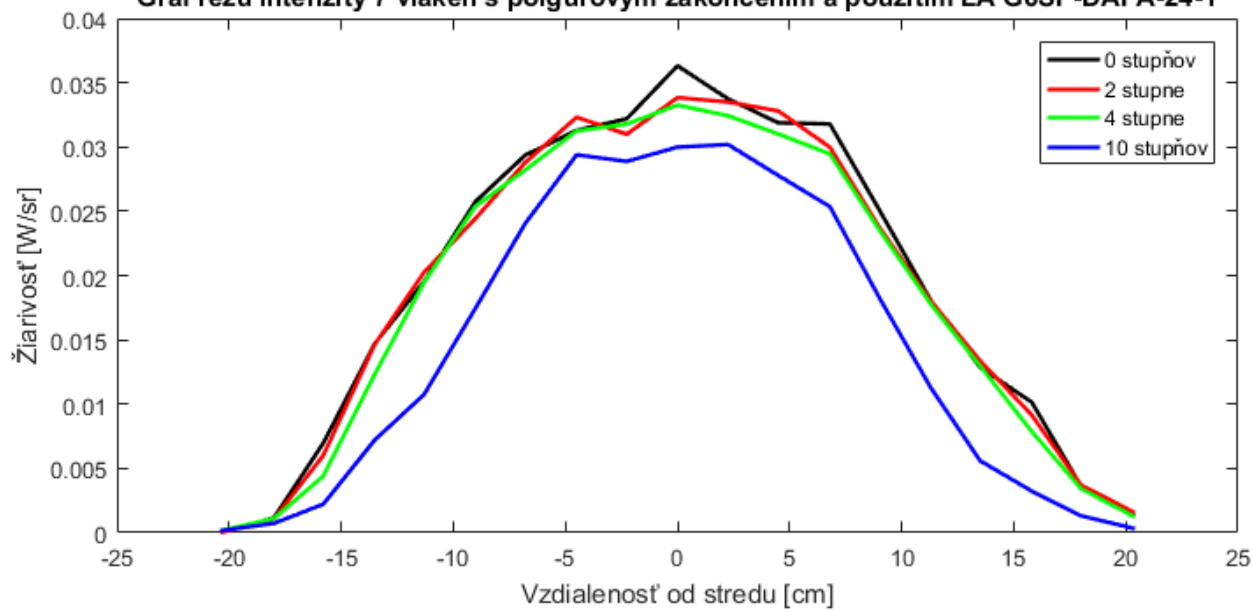
Graf rezu intenzity 19 vláken s kolmým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1



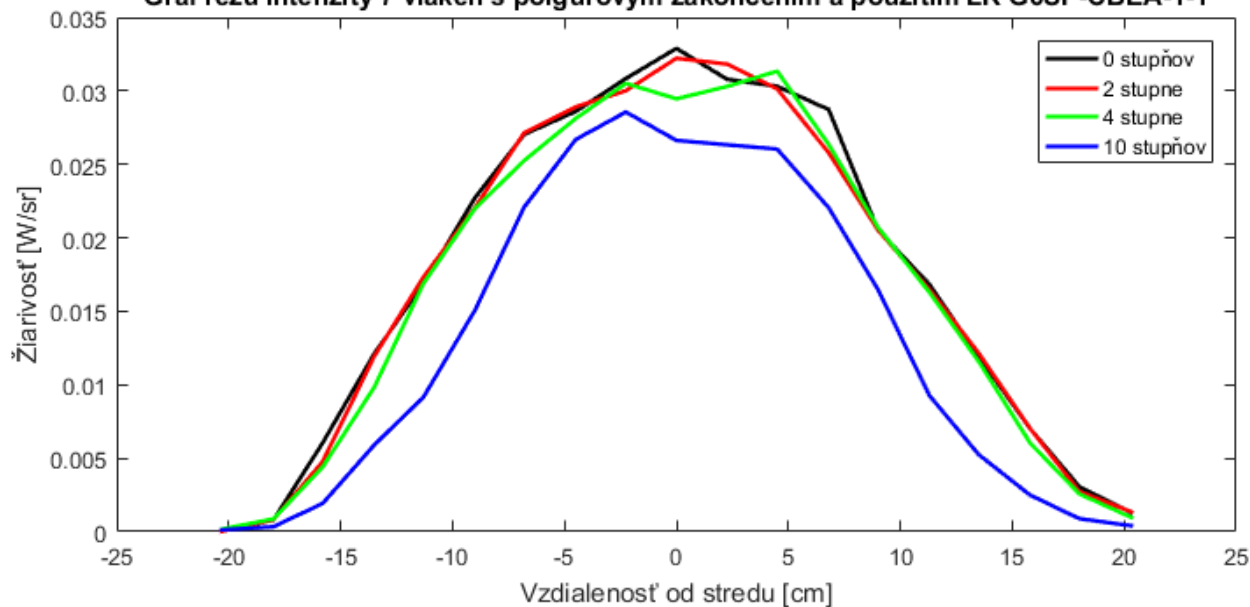
Graf rezu intenzity 19 vláken s kolmým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1



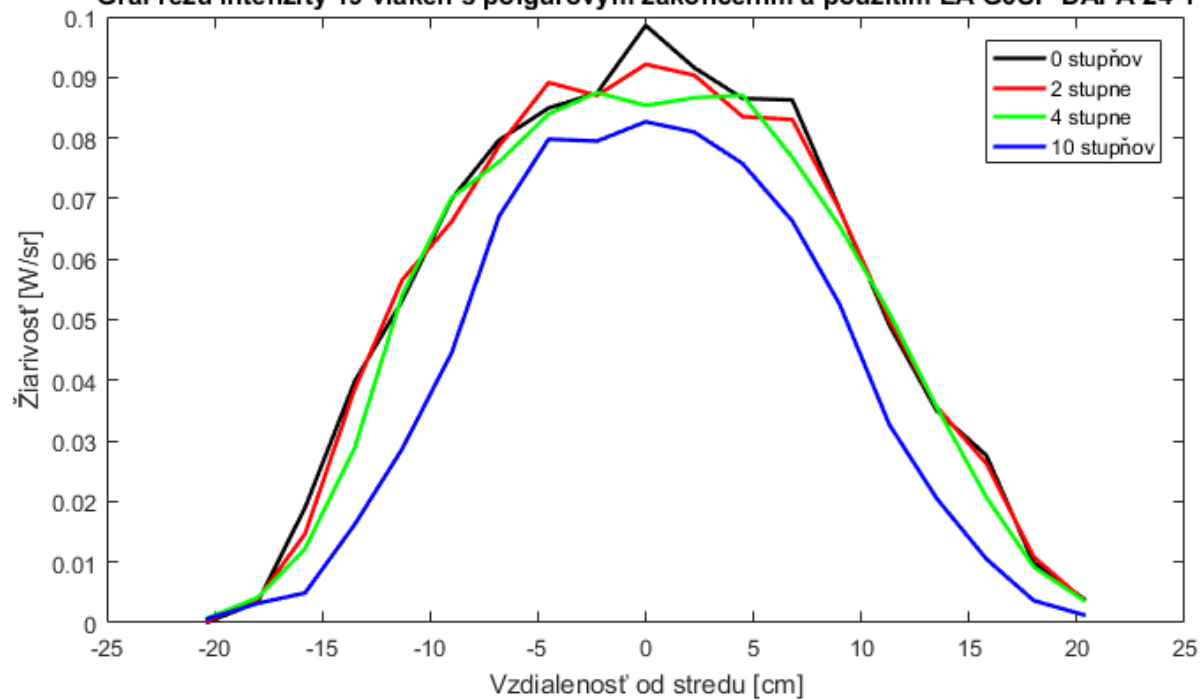
Graf rezu intenzity 7 vlákien s polgul'ovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1



Graf rezu intenzity 7 vlákien s polgul'ovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1



Graf rezu intenzity 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LA G6SP-DAFA-24-1



Graf rezu intenzity 19 vlákien s polguľovým zakončením a použitím LR G6SP-CBEA-1-1

